Les prémices d'ailleurs

Baptiste LEGOUIX
Illustrations de Cécile BAUDIN

2 juin 2017



"Vivre c'est comme les endives au jambon, c'est désagréable. Et c'est pas parce-que tu les recouvres de sauce au chocolat que ça devient cool."

"La vie ressemble à une pizza, tu mets ce que tu veux dessus et c'est ça qui la rendra bonne ou pas."

Préface

Ce livre est publié sous licence *Creative Common CC-BY-ND*, ce qui signifie qu'il peut être diffusé sur quelque support que ce soit - y compris pour une utilisation commerciale - sans même avoir à nous demander notre accord ; la seule contrainte étant que son contenu ne doit d'aucune façon être altéré (les citations sont cependant permises dans la limite du raisonnable).

Par conséquent, si vous avez eu à dépenser de l'argent pour acquérir ce livre (s'il venait à être édité par exemple, ce qui nous paraît très improbable en l'état mais qui pourrait bien arriver un jour), alors vous devez savoir que pas le moindre centime n'a servi à nous rémunérer. Pourtant, j'estime que l'écriture de ce début de livre a nécessité largement plus d'un millier d'heures de travail sur presque trois ans (un travail tout ce qu'il y a de plus plaisant bien sûr, mais pour quelle raison aurions-nous forcément à vivre d'un travail déplaisant ?)

C'est pourquoi nous avons ouvert une page Tipeee à l'adresse `www.tipeee.com/les-premices-d-ailleurs`, sur laquelle vous pourrez éventuellement nous faire un don ; fonction de vos moyens et de l'intéret que vous porterez à ce projet.

Si vous avez des propositions de correction à apporter ou des points sur lesquels vous êtes en désaccord, vous pouvez nous contacter (*via* la page Facebook par exemple). Nous remercions ceux qui prendront le temps de participer à faire tendre ce livre vers la compréhensibilité et l'exactitude la plus radicale.

Ce livre comprend actuellement deux chapitres, auxquels viendront s'ajouter au moins quatre autres. Initialement, je ne comptais rien publier tant que tous les chapitres n'auraient pas été complétés (ce qui demandera probablement quelque chose comme une quinzaine d'années étant donnée l'extrême lenteur de mon écriture). Cependant, le discours de Donald Trump à l'occasion de la sortie des USA de l'accord de Paris pour le climat - alors que j'avais sous la main ce texte justifiant mon profond désaccord avec la thèse qu'il soutenait alors - servit d'évènement déclencheur pour m'amener à revoir ma décision et finalement mettre en ligne ce que j'avais déjà.

Si j'ai décidé d'écrire ce livre, c'est avant tout pour éclaircir mes propres pensées vis-à-vis des difficultés à l'ampleur - j'espère réussir à vous en convaincre - tout à fait inédite auxquelles est sur le point d'être confrontée l'espèce humaine ; et dans un second temps pour apporter des solutions sur la base exclusive de raisonnements logiques et non de simples intuitions et croyances.

La quête de sens est moins chronophage mais bien plus épineuse que le simple activisme ; mais mérite selon moi qu'on y passe un peu de temps, histoire de

s'éviter les regrets liés à un important investissement personnel dans des causes qui pourraient bien finir par s'avérer ne pas en valoir spécialement la peine.

J'emploie souvent un air qui peut sembler un peu trop affirmatif - presque présomptueux - mais c'est seulement pour ne pas se traîner du conditionnel à chaque phrase. Ce que je présente est mon avis et seulement mon avis, mon opinion qui n'est d'aucune façon immuable ainsi que mes interprétations. J'essaie de donner clairement les postulats qui fondent mes raisonnements, lesquels postulats sont toujours discutables, et les raisonnements eux-mêmes ne sont cohérents que selon mon point de vue, qui n'attend que d'être enrichi par ceux des autres.

Initialement j'aurais voulu que ce livre s'adresse à tout publique qui aurait la curiosité de l'ouvrir, mais les retours que j'ai montrent que sa lecture est moins aisée que je ne l'aurais souhaité pour ce qui est des non-scientifiques. Il faut dire que je m'attarde souvent sur des choses qui ne sont pas essentielles à la compréhension du raisonnement global, et je pense cette complétude peut-être excessive être la source de confusion de ceux pour qui ces notions ne se sont jamais trouvées introduites (et mes phrases alambiquées, aussi).

C'est pourquoi je pense aujourd'hui que ce livre profitera surtout à un publique au minimum initié, ou encore à des personnes qui se trouveraient avoir des affinités avec le rigorisme logique sans forcément avoir encore jamais eu l'occasion d'exploiter ce potentiel sous l'angle de la science. Tout bien réfléchi, je pense que les lecteurs que j'ai le plus envie de toucher sont ceux qui seront prêts à s'inspirer de mes dires pour les simplifier, les communiquer et aller plus loin dans leur vulgarisation ; autrement dit à participer à la prise de conscience générale. Et ceux qui pourraient y trouver un sens à donner à leur vie, aussi.

S'il y a bien une chose qui a le potentiel d'incarner notre salut, je ne doute plus que ce doit être la *chaoticité* de plus en plus élevée qui émane des rapports humains, au sens de la *théorie du chaos*. C'est ce qu'on présente souvent comme l'*effet papillon*, et qui évalue la capacité d'un individu quel qu'il soit à bouleverser le cours de l'histoire. Nous est laissée la tâche de péréniser cette chaoticité (en prêtant de l'importance aux réseaux le jour où la question de les délaisser ou non pourrait bien se poser), et surtout d'en jouer de sorte à provoquer la rupture sociétale que je pense être nécessaire à la quiétude du monde des prochains siècles.

Sommaire

Chapitre 1

1.1 Le vaisseau-mère

Comme je ne sais pas vraiment par où démarrer, commençons par le début et - si vous le voulez bien - à dresser un tableau de notre histoire (lequel fera office de *fil rouge* à notre récit).

Voilà environ quatorze milliards d'années, l'*univers* au sens où nous l'entendons communément était tout entier contenu dans une sphère dont le diamètre était de l'ordre de $10^{-35}m$ ($0,0000...1m$ avec 35 zéros). Il s'agit de la plus petite longueur connue à ce jour (et de très loin). On appelle cet instant le *Big Bang*.

Il faut savoir - ça vous étonnera peut-être - que nous n'avons aucune idée de ce qu'il s'est passé *avant* car au moment où j'écris ces lignes, les conditions physiques de cette époque échappent à la compréhension des hommes. Il n'est donc pas question d'assimiler cette extraordinaire petitesse à un point duquel l'espace-temps aurait jailli. Au vu de nos connaissances, l'univers peut très bien dans un passé très lointain s'être contracté avant de *rebondir* sur lui-même au moment où il atteignit une taille de l'ordre de la distance particulière précédemment explicitée qu'on nomme *longueur de Planck*, pour enfin s'étendre et donner notre univers actuel. On pourrait même extrapoler ceci à un univers cyclique qui s'étendrait puis se contracterait périodiquement pour à chaque fois renaître de ses cendres par un nouveau Big Bang [29].

C'est une possibilité parmi d'autres, probablement pas la plus crédible dans la mesure où des observations astronomiques récentes laissent penser que l'univers tende plutôt à s'étendre de plus en plus vite [36]. Néanmoins, il résulte de ceci qu'avant de déterminer *ce qui est à l'origine de l'univers*, il serait peut-être pertinent de se demander *est-ce que oui ou non l'univers a une origine ?* En effet, dans la mesure où des modèles cosmologiques quantiques laissant penser à une forme de recyclage régulier de l'univers existent, nous ne pouvons pas nous positionner quand au fait que le Big Bang caractérise ou non la création de l'univers et de l'espace-temps à partir de rien.

Les théories qui sous-tendent ces tentatives de réponses restent de l'ordre de la spéculation et s'inscrivent dans le protocole de recherche propre à la physique qui consiste à émettre des hypothèses sur la réalité pour faire des prédictions,

afin de comparer celles-ci avec des mesures expérimentales.

Nous reviendrons prochainement sur des aspects de physique fondamentale, qui constituent l'origine profonde des contraintes auxquelles devra se plier l'humanité ; lesquelles forment le sujet principal de ce livre.

Le Soleil commence à exister environ dix milliards d'années après le Big Bang. Cette étoile est tout ce qu'il y a de plus ordinaire. Les évènements qui ont mené à sa formation sont encore incertains, mais il semblerait qu'une sorte d'immense nuage de poussière en rotation qu'on nomme *nébuleuse* se serait effondré pour entrer localement (à l'endroit qui deviendra le Soleil) en fusion nucléaire [41].

La formation des planètes du système solaire s'est faite dans la continuité de celle du Soleil. Le nuage s'est naturellement aplatit et les régions les plus denses se sont effondrées sur elles-mêmes sans que le mouvement global ne cesse.

La Terre est l'une d'entre elles. Toute la matière qui la constitue, tout comme celle qui constitue le Soleil, Mars ou toute autre planète du système solaire provient de la nébuleuse. Toutes les différences entre ces astres ont été acquises pendant leur formation.

Sous l'effet de la gravité, la pression augmenta au coeur des planètes de sorte que :

— Les planètes telluriques que sont Mercure, Venus, la Terre et Mars - qui sont les plus proches du Soleil - reçurent en conséquent un fort rayonnement lequel fît s'échapper leur dihydrogène et leur hélium (parce-que ceux-ci sont légers). Les éléments plus lourds purent alors s'agglomérer pour entrer en fission nucléaire.

— Les planètes gazeuses (Jupiter, Saturne, Uranus et Neptune) portent leur nom parce-que - trop loin du Soleil - elles ont gardé leurs éléments légers, lesquels empêchent la réaction de fission de s'enclencher.

La Terre est alors une gigantesque boule de magma, voilà environ 4,5 milliards d'années.

C'est peu après que l'eau apparaît sur Terre. On soupçonne qu'elle est arrivée par le biais de météorites de glace formées au sein du système solaire, et on sait qu'il y en a également eu en quantités importantes sur Mars.

La présence d'une si grande masse d'eau liquide sur une planète tellurique est remarquable, relativement rare au sein de la Voie Lactée (notre galaxie) ; mais pas unique. Bien que l'hospitalité du système solaire privé de la Terre nous interpelle sur le caractère extraordinaire de notre planète, n'est-ce pas pour autant que nous n'avons sous la main qu'une poignée d'exemples possible de ce que pourrait donner l'effondrement d'une nébuleuse en un astre ? Ce nombre n'est-il pas sérieusement insuffisant pour évaluer la fréquence d'apparition d'une planète semblable à la Terre, qu'on nomme exoplanète ? Du point de vue de l'univers tout entier ces conditions sont peut-être sommes toutes suffisamment fréquentes pour être vérifiées un grand nombre de fois. Nous en avons même découvert un exemple dans le système stellaire voisin - celui de *Proxima Centauri* - depuis 2016 [57]. Il s'agit alors de donner quelques ordres de grandeur en ce qui concerne les dimensions de notre réalité :

— Longueur de Planck : $10^{-35}m$ ($0,0000...1m$ avec 35 zéros)

— Rayon de l'atome d'Hydrogène : $10^{-11}m$
— Rayon de la Terre : $10^{6}m$ ($1000000m$)
— Rayon du Soleil : $10^{8}m$
— Rayon du système solaire : $10^{10}m$
— Rayon de la Voie Lactée : $10^{22}m$
— Rayon de l'univers observable : $10^{26}m$

Que dire de plus ? Sinon qu'il est remarquable qu'une cellule qui mesure $10^{-5}m$ soit située à proximité de la moyenne géométrique entre la longueur de Planck et le rayon de l'univers observable : $\frac{Cellule}{Planck} \sim \frac{Univers}{Cellule}$. La vie est à l'équilibre des échelles de distances.

1.2 La vie sur Terre

La probabilité d'apparition de la vie sur une planète est non-nulle (puisque nous sommes là pour en parler) bien qu'au plus assez faible. Il est donc possible que la Terre soit la seule planète habitée dans tout l'univers : il suffirait pour cela que la probabilité en question soit si faible qu'il n'y en ait eu qu'une seule itération. Mais rien ne nous porte à croire que ce soit le cas ; sinon l'intriguant fait que nous n'ayons encore jamais pû mettre en évidence un signal émis par une civilisation extraterrestre, ceci alors que les temps caractéristiques en jeu dans notre propre développement sont tels que nous serons probablement capables de faire ce genre de chose dans - au plus - quelques millénaires.

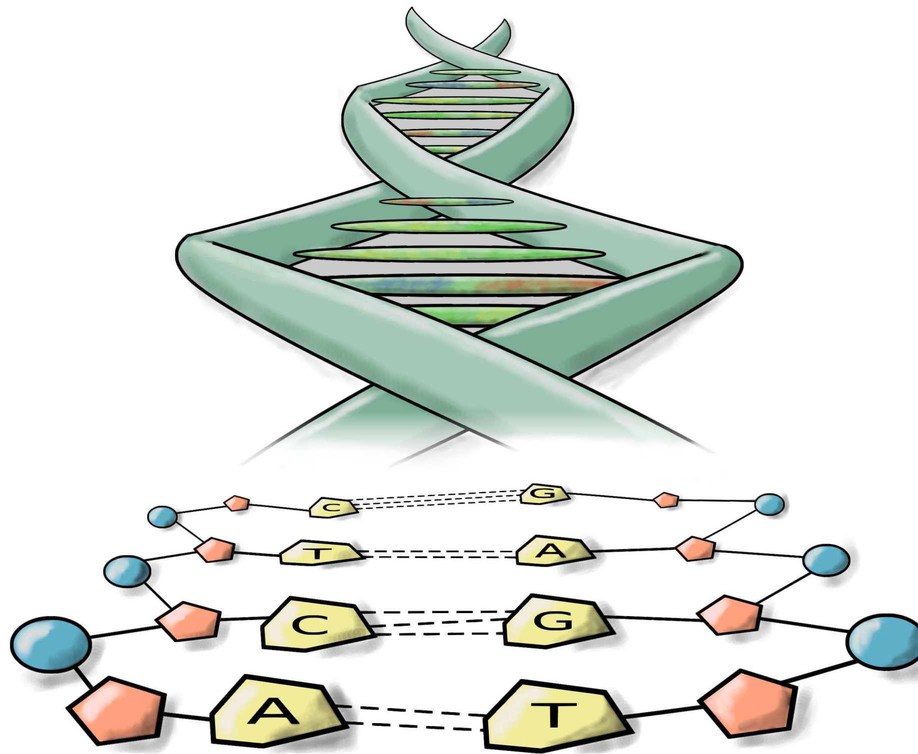
Un peu comme si nous étions les premières intelligences à émerger dans la région. Une autre théorie consiste à penser que les civilisations beaucoup plus agées que la notre sont dotées d'une sagesse telle qu'elles se cachent de nous ; peut-être pour ne pas interférer avec notre développement, qui sait ?

La vie est un agencement incroyable de quelques *atomes* : Hydrogène, Carbone, Azote, Oxygène et dans une moindre mesure d'autres éléments. Nous reviendrons ultérieurement en détail sur la nature dite *atomique* de la structure de la matière, que le physicien Richard Feynman qualifiait en prélude de son cours de “connaissance scientifique qui contiendrait le maximum d'information dans le minimum de mots” [11]. Pour le moment, contentons-nous de dire que la matière est composée essentiellement d'une grosse centaine de petits corps élémentaires que sont ces atomes.

Les atomes se combinent usuellement en *molécules*, mais ce qui est remarquable avec les molécules qui forment la vie (dites *organiques*) est leur incomparable potentiel de complexité. En effet, si les molécules ordinaires comprennent rarement plus de quelques dizaines d'atomes ou bien dessinent un motif simple et unique sur de longues distances, en ce qui concerne les molécules organiques on peut trouver des structures beaucoup plus... hasardeuses.

L'archétype de ces agencements moléculaires exotiques se trouve également être l'entité fondamentale du vivant sur Terre, que l'on appelle *ADN*. De la compréhension de l'ADN découle toutes les distinctions qu'il peut y avoir entre le vivant et la matière inorganique. Peu d'éléments scientifiques peuvent intervenir dans des discussions philosophiques au même point que l'ADN, comme

j'aimerais commencer à le dépeindre dans ce chapitre.



Il existe quatre espèces de *nucléotides* ADN (qui sont des groupements organiques). C'est à dire qu'il n'y en a que quatre variétés. Dans un environnement gelé, ces nucléotides s'assemblent spontanément. Ils peuvent alors former de longues, très longues chaînes qui se comportent comme des mémoires en base 4. Et ça, c'est vraiment très surprenant.

Nous comptons en base 10. C'est à dire que nous utilisons dix chiffres pour exprimer tous les nombres naturels (0, 1, 2...). Dès que nous arrivons à une succession de neufs nous ajoutons un chiffre à gauche pour continuer de compter : 98, 99, 100, 101... Les ordinateurs comptent en base 2 [30], laquelle est la plus petite base possible : 0, 1, 10, 11, 100... On peut passer d'une base à l'autre sans problème ! Le vivant terrien compte en base 4. En fait peu importe la base, ce qui est important est que le vivant *compte*.

C'est à dire qu'à chacune de ces chaîne nous pouvons associer un nombre prodigieusement grand qui la définit tout à fait, dans le sens où si l'on me donne ce nombre, la convention choisie (Pour un brin d'ADN il y a vingt-quatre nombres possibles suivant quel chiffre on décide d'associer à chaque nucléotide), un bon paquet de nucléotides et les outils qu'il faut je peux reconstituer cette molécule à l'atome près.

Prenons un exemple. Sur le dessin précédent, on peut voir figurer les quatres types de nucléotides : A, C, G et T. On associe à chacun de ces nucléotide un chiffre entre 0 et 3, ce qui est caractéristique d'une base 4. Ainsi, la suite de nucléotides $CTCA$ sur le brin de gauche peut s'écrire numériquement 1310. Pour ne pas bouleverser nos habitudes, on pourrait finalement s'amuser à écrire ce nombre en base 10, ce qui donnerait :

$$\begin{aligned} 1 \times 4^3 + 3 \times 4^2 + 1 \times 4^1 + 0 \times 4^0 \\ = 1 \times 64 + 3 \times 16 + 1 \times 4 + 0 \times 1 \\ = 64 + 48 + 4 + 0 \\ = 116 \end{aligned}$$

Bien sûr, si nous avions considéré le brin d'ADN complet qui comprend plusieurs dizaines de millions de nucléotides [42][33], le nombre obtenue contiendrait à peu près le même nombre de chiffres. On peut ainsi dire que le nombre représenté par un brin d'ADN est de l'ordre de $10^{10000000}$, ce qui est absolument hors de porté de notre appréhension.

Le nucléotide ADN possède une autre propriété stupéfiante. En plus de s'assembler avec n'importe quelle sorte de nucléotide ADN de chaque côté, il attire frontalement son nucléotide *conjugé*. Pour imager, de chaque côté d'un nucléotide de type A on peut trouver n'importe quel type de nucléotide. Mais devant le nucléotide de type A il y a forcément un nucléotide de type T. Tout comme devant un nucléotide de type T on a un type A et devant un nucléotide de type C, un type G.

Ce procédé laisse apparaître un double négatif à la chaîne, constitué de l'intégralité de ses nucléotides conjugués. Ces deux chaînes qui codent des nombres eux aussi conjugués se font face et s'enroulent : ce sont les hélices de l'ADN.

On en arrive alors à comprendre que l'ADN peut se dupliquer en séparant ses deux chaînes. En effet, si les deux branches isolées sont en présence de nucléotides libres, ceux-ci vont venir s'accrocher à chacune des chaînes pour reformer la chaine conjugée manquante. Le brin d'ADN s'est alors *répliqué*.

Il est donc question d'un nombre faramineux qui apparaît sous forme de chaîne de nucléotides, laquelle a la capacité de se dupliquer...

En associant des brins d'ADN on obtient un chromosome. En associant des chromosomes on obtient des noyaux de cellules. Ceux-ci contiennent tout entier notre *génome*.

La capacité à se répliquer se retrouve chez les noyaux cellulaires qui vont alors produire le reste de la cellule pour se protéger, avant de se multiplier, se multiplier encore, et encore jusqu'à former des êtres vivants tout en suivant à la lettre les informations des brins d'ADN : notre corps est ainsi modelé par les nombres qui constituent notre génome.

Les êtres vivants ont eux-même la capacité de se répliquer en mettant en contact une de leurs cellules reproductrices avec la cellule reproductrice d'un autre être vivant de la même espèce. Le génome du nouvel être vivant sera

alors une combinaison des deux (moitié des chromosomes viendra du premier et l'autre moitié du second).

Il ne faut cependant pas oublier que les êtres les plus faibles - ceux qui ont le génome le plus défavorable - ont légèrement plus de chances de mourir jeunes et de ne pas avoir le temps de transmettre ces mauvais gènes aux générations suivantes que leurs congénères. *En moyenne*, les gènes en question vont tendre à disparaître, ce qui renforce l'espèce sur le très long terme toutes choses égales par ailleurs. C'est le processus d'adaptation cher à Darwin.

Darwin, qui n'avait pas connaissance de l'existence du génome bien que sa théorie se soit avérée en être une conséquence directe, était néanmoins incapable d'expliquer la pratique de l'*altruisme* (fait de privilégier l'intérêt commun au détriment de sa propre reproduction) chez certains animaux comme les insectes sociaux ou chez la marmotte, laquelle n'hésite pas à crier pour alerter ses congénères d'un danger au risque de se faire repérer. Cela s'explique facilement en considérant que le but d'un individu n'est pas bêtement de se reproduire au maximum, mais d'assurer la pérennité de son génome ; le génome de deux représentants d'une espèce étant commun à plus de 99%.

En fait, tout se passe comme si les gènes - ces nombres qui de par leur existence physique forment la vie - cherchaient à assurer leur pérennité individuelle par le biais des êtres qui les portent. Ce peut sembler délirant, mais c'est manifestement le cas. Lorsqu'un être vivant pratique l'altruisme, il met de coté ses spécificités en tant qu'individu pour assurer la transmission de son génome à travers la protection de ses congénères.

Bien sûr, un gène en tant que tel n'a pas de volonté propre. Le fait que le fragment de nombre qu'il incarne encourage un comportement qui permet sa préservation est un pur hasard ; mais qu'un tel gène ait pu traverser les âges n'en est pas un.

Si l'on écarte l'aspect culturel, on peut certainement dire qu'un être vivant n'est rien d'autre qu'une collaboration d'informations génétiques qui travaillent de concert pour persister par tous les moyens. Des nombres qui existent parcequ'ils s'accordent entre eux pour faire front à la rigueur de leur environnement.

1.3 Le corps et l'esprit

Certains génomes engendrent alors des bactéries. D'autres des plantes inertes. D'autres encore des arbres fruitiers, des insectes, des dinosaures, des singes, des hommes... Au fond, qu'est-ce qui différencie toutes ces espèces ?

A notre échelle, nous avons l'habitude de séparer les êtres vivants macroscopiques en trois catégories : le végétal, l'animal et l'homme (il y a aussi les champignons, bactéries et autres). Il est vrai qu'au premier abord le rôle de la flore ne semble qu'être servir de garde-manger renouvelable pour la classe animale, laquelle est dotée d'un cerveau, de plusieurs sens et de puissantes facultés physiques qui les rendent largement supérieurs.

Aujourd'hui, les généticiens considèrent que cette distinction profonde n'est qu'apparente. Pensez au corail, aux mollusques, aux plantes carnivores... Elles

ne sont pas si nombreuses, mais il existe des espèces qui semblent se situer près de l'hypothétique frontière qui sépare les végétaux des animaux.

Et en ce qui concerne l'homme ? Nous sommes une variété de singes, et il est légitime de se demander ce qui a bien pu faire que nous ayons atteint le stade qui est le notre dans l'évolution. Nous pouvons déjà dire que si fondamentalement tous les êtres vivants sont issus des mêmes végétaux primitifs, alors ils ne forment qu'une seule classe indivisible. Je n'affirmerai pas qu'il n'y a aucune faille dans notre compréhension de l'évolution du vivant, loin de là, mais le processus global semble relativement clair et a a priori peu de chance d'être profondément remis en question dans le futur.

Alors, quelle est la différence fondamentale entre l'homme et l'animal ? Ce ne sont certainement pas les capacités cognitives en générale, puisque celles du singe peuvent s'avérer plus développées que celles de l'homme. Demandez à un chimpanzé de mémoriser rapidement une suite de chiffres, qui que vous soyez vous ne serez pas à la hauteur [12]. Alors quoi ?

La réponse à cette question ne fait certainement pas consensus, mais selon moi (et beaucoup d'autres) c'est une question de langage. L'homme est le seul être vivant capable de communiquer comme il le fait avec ses pairs. Les animaux peuvent transmettre des messages prédéfinis, mais il n'existe pas à notre connaissance de syntaxe animale (capacité à combiner les mots pour former des phrases). Sauf chez le singe.

Pendant la seconde moitié du XXème siècle, nous avons mené des expériences aux résultats inattendus sur les primates : ceux-ci sont manifestement en mesure de comprendre notre langage et de nous obéir. Vous trouverez une vidéo sur internet où le bonobo Kanzi verse du savon dans de l'eau sur simple demande [19].

Plus récemment, nous avons découvert les prémices d'un langage primitif chez certains primates, par le biais de la pluralité de leurs cris [32]. Les conséquences d'une telle découverte consolident évidemment l'hypothèse selon laquelle l'homme aurait acquis son intelligence suite à l'émergence d'une configuration physiologique particulière permettant la constitution d'un vocabulaire riche ; et non l'inverse.

Pour être tout à fait exact, les systèmes phonatoire et lexico-cognitif [31] que nous possédons aujourd'hui sont bien le résultat de l'évolution, du fait de l'avantage indéniable qu'apportait une bonne élocution à nos ancêtres. Mais encore avant que cette aptitude ne devienne réellement utile, il a d'abord fallu dépasser un certain stade singulier où cette particulière capacité n'était encore qu'archaïque, et bel et bien un aléa évolutif.

C'est pourquoi il ne faut, dans cette affaire, surtout pas sous-estimer l'importance de l'évolution. L'homme est homme parce qu'il parle. Mais ça ne suffit pas, car alors en apprenant des rudiments de langage humain aux singes, ceux-ci devraient être en mesure de commencer à converser entre eux et atteindre un niveau au moins proche de celui de l'homme. Par ailleurs, les sourds-muets qui n'ont pas accès à la langue des signes devraient êtres caractérisés par un comportement tout à fait sauvage.

L'explication réside dans le fait que les choses se font sur plusieurs millions

d'années. C'est pour cette raison qu'un singe ne comprendra jamais plus de mots qu'un enfant de trois ou quatre ans.

Il y a déjà eu sur Terre coexistence de plusieurs espèces dotées du langage : L'homme de Néandertale et l'Homo-sapiens. Cependant, bien qu'il y ait des différences physiologiques notables entre celles-ci, il est probable qu'elles aient fusionnées lorsqu'elles se sont rencontrées.

En fait j'utilise la notion d'*espèce* depuis tout à l'heure, mais il est admis qu'il est impossible de définir rigoureusement ce mot. Il n'est question que de groupements d'êtres vivants qui se restreignent ou sont restreints à n'avoir des rapports sexuels qu'exclusivement entre eux, se distinguant petit à petit de leurs parents ; mais qui sont toujours physiologiquement aptes à se reproduire avec les membres des espèces qui leurs sont proches.

Ce n'est donc qu'une question de temps avant qu'une nouvelle espèce terrienne dotée du langage ne surgisse et ne prenne progressivement le contrôle de la Terre aux cotés de ce que sera l'humanité dans quelques millions d'années (laquelle aura bien changée, si seulement elle existe toujours). De fait, il n'y a aucune raison pour qu'il n'y ait pas dans l'univers un grand nombre de civilisations incroyablement plus avancées que la notre.

Notez qu'en plus de pouvoir parler avec ses pairs, l'homme a acquis avec le langage l'aptitude de la *raison*. Non seulement il est capable de communiquer, mais il est également en mesure d'énoncer des raisonnements *logiques* qui se veulent par définition vrais, ce qui est selon moi plus important encore (notez que "raisonnement logique" est un pléonasme). Paul Dirac, éminent physicien du XXème siècle probablement atteint du syndrome d'Asperger, pensait que le langage était dédié à la vérité et qu'il ne fallait pas détourner son rôle. Or quotidiennement nous autres simples non-autistes usons rarement du langage pour dire la vérité, ce qui amena ses collègues à définir une nouvelle unité : $1dirac = 1mot/heure$. Ainsi, lors d'un dîner mondain donné à Cambridge, Dirac se trouve au côté d'un ministre lequel essaye d'entamer la conversation par un "Very windy today, isn't it ?". Dirac se lève, se dirige vers la porte-fenêtre, l'ouvre, fait un pas dehors, hume l'air, revient s'assoir et lâche un "Yes, sir.".

Il se trouve qu'il existe un langage inventé par les mathématiciens et dédié à l'articulation des *propositions* (des choses qui peuvent êtres vraies ou fausses) entre elles, c'est à dire à la construction du raisonnement. Il comprend d'ailleurs peu de mots, c'est pourquoi on a choisi de le rendre symbolique. Mais à part ça, il n'est pas un meilleur langage qu'un autre. On peut tout à fait faire de la logique avec les langues usuelles. C'est d'ailleurs le cas quand on fait de la philosophie, laquelle repose tout autant sur la logique que la mathématique. Les langues usuelles sont bien plus adaptées que la logique formelle à la philosophie, car elles sont beaucoup plus riches en vocabulaire bien qu'au fond, le raisonnement soit structuré exactement de la même manière qu'en mathématique. Cependant, la pluralité des nuances de sens des mots pose un problème majeur qui n'existe pas avec le formalisme mathématique : une phrase peut-être sujette à interprétation.

Il y a donc deux applications aux langage : la communication et le raisonnement, lesquels sont tous deux des outils formidables qu'ont les hommes à leur disposition et qui les rendent si supérieurs en apparence aux autres espèces...

Nous avons vu que les particularités physiques d'un être vivant au sein d'une espèce sont donc toutes entières déterminées par son génome, dans le contexte de son environnement. Qu'en est-il des particularités mentales ?

J'appelle esprit ou âme (vous allez voir que selon moi il n'y a pas de distinction entre les deux) l'entité essentielle associée à tout être vivant et qui va lui servir de guide, le commander.

La question suivante taraude les philosophes (ou autres mortels plus humbles) depuis des siècles : *l'esprit est-il intrinsèque au corps ?* Dans la mesure où je ne fais pas de différence fondamentale entre les différentes espèces, il n'est pas question de dire que c'est le cas pour telle espèce et pas pour telle autre. Je pense donc que si l'esprit est distinct du corps pour l'homme, il l'est pour tous les êtres vivants. Même chez le brin d'herbe (bien que dans la mesure où celui-ci n'ait pas de cerveau, il ne puisse pas en faire grand-chose).

Le corps découle pour partie du génome, et pour partie de notre vécu qui l'altère. Si l'esprit est intrinsèque au corps, cela signifie qu'il n'est rien d'autre que le câblage du réseau de neurone qui constitue notre cerveau.

Ce problème corps-esprit est donc en un sens analogue au problème du *libre-arbitre*. Toujours dans l'hypothèse où l'esprit et le corps ne font qu'un, quelle que soit la situation que nous rencontrions, notre réaction est déterminée à l'avance. Soyons clair : on ne peut alors pas dire que nous soyons voués à suivre un destin entièrement déterminé par la fécondation - car notre génome ne dit pas quelles situations nous allons rencontrer et à quelle période de notre vie, ce qui suffit à justifier les différences de personnalités qu'il y a entre deux vrais jumeaux - mais il est dans le même temps tout à fait illusoire de parler de libre-arbitre.

En outre, en concevant ou simulant sous ordinateur un cerveau artificiel, on pourrait être en mesure d'obtenir un esprit. Un bon sujet pour un roman de science-fiction, bien que pas très original.

Un ordinateur n'est rien de plus qu'une machine à faire des calculs. Il ne fonctionne évidemment pas du tout comme un esprit, lequel est relativement mauvais pour calculer mais possède dans le même temps des capacités complètement inconnues de l'ordinateur à ce jour.

Toute la question est de savoir si oui ou non les capacités propres à l'esprit peuvent-être acquises par un ordinateur. Autrement dit, existe-t-il un algorithme qui puisse faire penser l'ordinateur comme un humain, c'est-à-dire avec des mots ? Si oui, le cerveau peut alors n'être qu'une machine à calculer qui fait tourner un tel algorithme pendant toute une vie.

Remarquez qu'il vaudrait mieux prendre beaucoup de précautions lors de l'exécution d'un tel algorithme. En effet, dans l'hypothèse où il est suffisamment rapide, un ordinateur doté d'une volonté propre réfléchirait si vite qu'il aurait trouvé et exploité la moindre faille dans son système informatique pour élargir l'éventail de ses capacités en une fraction de seconde. On parle de singularité technologique, et elle ferait elle aussi un bon sujet pour un roman de science-fiction.

Mais on peut tout aussi bien postuler que l'esprit doit être une essence supplémentaire à ajouter au cerveau pour pouvoir le faire tourner. Cette essence, c'est nous, vraiment nous, et le corps n'est que notre incarnation dans la réalité.

L'esprit n'a alors rien à voir avec l'ADN et il n'est pas question de voir un jour des robots se rebeller contre les humains. Dans ce cas, nous gardons plein pouvoir sur nos actes, nos comportements... C'est le libre-arbitre.

Ce débat est peut-être le plus passionnant de tous, car il nous interroge sur le sens qu'on peut donner ou non à l'existence (et notamment à *son* existence).

Avec un libre-arbitre, nos âmes ont la pleine maîtrise de nos faits et gestes, et nos choix sont déterminants dans l'évolution de la partie de l'univers qui nous est causalement reliée [47]. Ce qui ne suffit pas à expliquer ce pourquoi nous sommes sur cette foutue planète, c'est à dire s'il y a un but ultime à atteindre *à la fin* ou non, mais qui permet au moins de se convaincre que cet accomplissement final existe peut-être ; auquel cas nous serions les acteurs d'un fantastique jeu collaboratif et universel.

L'existence d'une entité immatérielle dont le corps ne serait que l'habitat permet également toutes sortes de spéculations sur la persistence post-mortem. En ce sens, la théorie du libre-arbitre est clairement l'hypothèse la plus rassurante.

Sans libre-arbitre, nos choix ne sont que la conséquence d'une physique compliquée et peut-être même hasardeuse pour le peu qu'on en sache. Auquel cas nous n'évoluerions qu'à travers - pourquoi pas ? - une sorte de simulation informatique de l'univers tout entier, ce qui n'est d'ailleurs pas sans rappeler le caractère discrétisé que donne la théorie quantique à toute chose qui compose celui-ci ; et certaines tentatives d'unification de la physique quantique et de la relativité générale à l'espace-temps lui-même [51][5] (qu'on caractérise alors par des *pas d'espace-temps* de l'ordre des longueur et durée de Planck).

Dans ces conditions, il est bien plus difficile de trouver un sens à donner à nos vies. Je suis moi-même convaincu de l'intéret sur le plan personnel qu'il y a à accorder un poids considérable aux choix que nous faisons, et c'est pourquoi j'ai longtemps été partisan de l'hypothèse du libre-arbitre. Mais récemment, une personne très importante pour moi qui se trouve être l'illustratrice de ce livre a su me convaincre de l'inélégance de cette théorie (laquelle ne fait après tout qu'ajouter une brique supplémentaire à quelque chose d'intrinsèquement cohérent).

Je me suis alors mis en quête d'un sens profond à donner à l'existence (à *mon* existence) dans le cadre de l'absence du libre-arbitre. Voici le seul que j'ai pu imaginer jusqu'à présent :

Il n'y a pas de but ultime que les espèces vivantes de l'univers se doivent d'accomplir pour *gagner la partie*. Il n'y a ainsi pas de choix déterminant dans l'accomplissement ou non de ce but hypothétique. Et il n'y a rien d'autre que la disparition de l'esprit après le décès, par extinction de l'activité cérébrale.

La seule chose qui soit est un morceau de musique, une *oeuvre grandiose* qui est - si l'on veut - la superposition des mélodies de chaque partie de l'univers. Ce morceau a un début et une fin, et son existence ne se justifie que par son *esthétisme*.

Je prends l'exemple de la musique, mais ce n'est bien sûr qu'une alégorie. Je vois ça comme une belle histoire, dont le support importe peu. D'ailleurs, j'aime aussi le présenter sous l'angle de la poésie. C'est cool, la poésie. Mais peu

de personnes apprécient la poésie. Peut-être parce-qu'on leur a demandé d'en apprendre par coeur à l'âge de six ans, va savoir.

Nous ne serions que les spectateurs d'un film très prenant, dont les corps seraient les acteurs et les âmes les entités tout à fait déterministes mais pas moins destinées à apprécier la profondeur du scénario.

Faire des choix illusoires qui rendent le monde joli. N'est-ce pas une séduisante vision de notre existence, en soi ? Reste à savoir si elle n'est pas elle-même tout à fait illusoire... Et si cette question a seulement une quelconque forme d'importance ou pas.

1.4 La folie des hommes

Comme je l'ai dit, l'homme se distingue des autres espèces par son aptitude particulière qu'est le langage et qui trouve deux applications : la raison et la communication. Si la première permet aux hommes de faire de la science et de comprendre le monde dans lequel ils évoluent, c'est la seconde qui m'intéresse dans ce chapitre.

Il semble évident qu'il ne peut y avoir d'organisation sociale s'il n'y a pas de communication. Si nous avions la raison mais aucun moyen de partager nos pensées avec nos homologues, l'espèce humaine serait vouée à l'individualisme. Mais il se trouve que ce n'est pas le cas, et l'homme est ainsi capable de transmettre son savoir à autrui, de négocier, d'établir des accords.

Considérons un homme seul. Il a *peur*. Il a peur car il appartient à une espèce dotée du langage. Il est prêt à accepter un duel si nécessaire, car son adversaire serait en moyenne aussi fort que lui ce qui rendrait le combat équilibré. Mais il sait que ses pairs sont en mesure de former des alliances, des clans et c'est ça qui l'effraie. Seul contre plusieurs, il n'a aucune chance. Que faire ? Il n'a pas le choix, il doit lui-même s'associer à d'autres.

Voilà la première cause des maux de l'humanité : la peur de l'autre. La peur de l'étranger, qu'on imagine méchant et sanguinaire. C'est bien cette peur qui nous pousse à nous renforcer, à former des groupes humains de plus en plus grands.

Plus on est nombreux, plus on est puissant. Mais on n'est jamais assez puissant. Il faut donc toujours augmenter son nombre. Pour ce faire, on a deux principales possibilités : fusionner des clans - c'est la Grèce antique, l'union européenne - et conquérir de nouveaux groupes humains. C'est la seconde voie qui a été la plus employée au cours de l'Histoire.

Voyez-vous le paradoxe ? On a peur d'être trop faible en cas d'agression, donc on agresse un plus faible que nous pour se renforcer. C'est une exemple profond et parfait de ce qu'on nomme *Équilibre de Nash* en mathématique : les hommes auraient tout intérêt à ne pas se faire la guerre, mais comme les pertes en cas de trahison sont trop importantes on préfère jouer la prudence et passer soi-même à l'attaque.

Au sein d'un clan, la confiance supplante la peur. L'idée est de mettre en place une réglementation vouée à briser cet équilibre de Nash et tendre vers une

organisation sociale optimale. Autrement dit, les membres du groupe choisissent d'adopter un *code moral* commun qui se doit de prémunir le groupe contre les affrontements internes. Cela demande de l'organisation car il faut se mettre d'accord sur les idées à inclure dans le code et prévoir des sanctions. C'est cette organisation qu'on appelle la *politique*.

Il existe à ma connaissance quatre systèmes politiques :

— *L'anomie*, absence de loi, ne peut exister que dans une société dans laquelle ses membres se font pleinement confiance. Elle consiste à considérer que tous les hommes sont capables d'élaborer et du moins d'adopter indépendamment une morale personnelle qui sera suffisamment juste pour assurer la cohésion du groupe. Ce qui revient à croire que l'équilibre de Nash peut être brisé par d'autres moyens que la répression.

— *La démocratie*, le pouvoir au peuple, ne peut exister que dans une société où les gens sont suffisamment *sages* pour écrire leurs propres lois ensemble. De plus, elle nécessite que les gens aient confiance en la sagesse de la plupart de leurs pairs. Ce sens premier a bien entendu été fortement altéré, nous y reviendrons en détail dans un chapitre ultérieur. Remarquez que l'anomie et la démocratie sont toutes deux des régimes *anarchiques*, sans chef.

— *L'oligarchie*, le pouvoir d'un petit nombre, consiste pour une société qui ne respecte pas les conditions ci-dessus à désigner un petit nombre de personnes supposées suffisamment sages pour écrire ces lois.

— *La monarchie* est l'extrapolation de l'oligarchie quand ce petit nombre se réduit à un unique individu tout-puissant.

Ce sont ces deux dernières catégories qu'on trouve principalement quand on déroule l'histoire, y compris au XXIème siècle. Il y a quelques contre-exemples : la démocratie Athénienne, les peuples Pygmés et Inuits... mais qui au final restent très marginaux.

Faisons le point : les hommes se sentent vulnérables quand ils sont seuls, c'est pourquoi ils choisissent de former des clans et donc d'adopter une morale commune qui dissuade tout comportement susceptible de mettre en danger la cohésion du clan. Mais comme ils n'ont pas confiance en leur propre sagesse ou en celle de leurs pairs, ils établissent une hiérarchie et désignent un ou des supérieurs supposés particulièrement sages pour écrire la loi et la faire appliquer.

Il y a 30000 ans, les espèces qui forment le genre Homo couvrent la planète. Toutes les espèces parentes de l'Homo Sapiens sont éteintes voilà 15000 ans. On observe alors les premières traces de sédentarisation au proche-orient (Natoufien), puis un peu partout sur le globe. Les civilisations bien documentées apparaissent vers -3500 avec les Sumériens et les Égyptiens.

Et il se trouve que dans les deux cas, on a affaire à une monarchie dans laquelle le souverain est assimilé à un dieu. Ce qui m'amène à aborder le sujet de la religion.

Dans l'antiquité, il est arrivé de multiples fois que la religion ait permis à un individu d'exercer un pouvoir sans limite sur son peuple. Un pharaon ou un roi sumérien se voyait réaliser le moindre de ses désir, et remettre en cause son autorité aurait été faire preuve d'hérésie.

Je suis agnostique, c'est à dire que j'admets ne pas avoir d'opinion à propos de Dieu. Je n'ai pas de raison de penser qu'il existe, mais je n'en ai pas non plus de croire que son existence puisse seulement être infirmée un jour. Je n'exclu cependant pas de devenir croyant dans le futur, n'ayant toutefois aucune idée de ce qui pourrait me pousser à le devenir.

Mais ça va plus loin, car je ne suis pas convaincu que la question de l'existence de Dieu soit très intéressante... Je ne crois pas avoir besoin de ça pour me construire une ligne de conduite, mais j'invite de tout coeur ceux pour qui c'est le cas à continuer.

Posons le postulat - qui me semble le plus rationnel à première vue - consistant à dire que si Dieu il y a, jamais personne n'a interagi avec lui ; ce qui revient à affirmer que tous les prophètes sont ou bien fous, ou bien des escrocs. En fait le problème réside dans le concept même de prophète, individu que Dieu aurait désigné comme son interlocuteur privilégié, soi-disant à cause de son extraordinaire obéissance, fidélité ou sagesse. J'ai bien peur de ne pas trouver ça crédible.

Il est clair que les textes sacrés - une fois contextualisés d'une façon bien particulière - véhiculent des valeurs justes et belles. Mais si vous êtes juif ou chrétien, vous concéderez que ce serait faire un bel euphémisme que de dire que l'ouverture de vos livres sacrés respectifs qu'est la Génèse est pour le moins fantasmagorique si on la prend au premier degré. Selon la tradition juive, Dieu aurait dicté ce récit à Moïse. Pourquoi donc Dieu nous aurait-il transmis un récit erroné ? Si j'étais juif, la seule interprétation en accord avec mes convictions que je pourrais faire consisterait à dire que la Génèse renferme un message caché que nous nous devons d'extraire du faux.

Mais puisque je ne le suis pas, je suis bien forcé de conclure qu'une personne a inventé le récit de la Génèse avant de le transmettre oralement ou par écrit. Je ne dis pas que cette personne était forcément malintentionnée. Mais quelle qu'en soit la raison, dans la mesure où partie d'un texte s'avère inexacte on se doit de s'interroger sur la crédibilité du reste du livre. Quelle est la part d'extrapolation dans le récit de la vie d'Abraham ?

Remarquez que je n'essaye pas de vous convaincre de la pertinence de la posture agnostique, je fais juste de mes croyances un postulat et en cherche les conséquences.

Selon la Torah au cours de la seconde partie de sa longue vie, Abraham s'est beaucoup enrichi et s'est retrouvé à la tête d'un grand nombre de personnes. Il aurait été choisi par Dieu pour tenir ce rôle. Mais si comme je le crois jamais aucun Dieu n'est entré en contact avec un humain, alors le mensonge d'Abraham lui a permis de réunir une large communauté qui partage ses valeurs. C'est une façon de faire la révolution : plutôt que de s'attaquer aux puissants et intouchables rois sumériens, Abraham invente une nouvelle religion et invite ceux qui le souhaitent à le rejoindre. Il conçoit ainsi une nouvelle société composée d'individus consentants à suivre ses propres enseignements, bien qu'il les fasse passer pour ceux de Dieu.

On peut aussi imaginer qu'Abraham aurait simplement recherché le pouvoir et la fortune... Pourquoi pas, je n'en sais rien. C'est une hypothèse que je n'exclus

pas, sans pour autant avoir de raison d'y adhérer.

En tous cas, la religion est un moyen formidable pour assurer la cohésion d'une monarchie. Cela immunise le chef contre toute forme de contestation au sein des sociétés archaïques : personne ne trouvera jamais rien à redire au fait qu'un homme choisi par Dieu ou Dieu lui-même puisse être par essence considéré comme supérieur aux autres. Ceci annule le risque de conflits internes et d'éclatement du groupe. De plus, le chef peut en profiter pour présenter ses lois comme dictées par Dieu de sorte qu'elles ne puissent en aucun cas être remises en question.

Si nous n'avons aucune trace d'athéisme à cette époque, c'est peut-être parce-qu'un groupe athée n'aurait pas su s'organiser efficacement et son pouvoir aurait été disputé de sorte que le groupe se serait avéré trop fragile pour perdurer.

Selon ce même point de vue, il n'est pas étonnant non plus que Jésus ait réussi à extraire un groupuscule de résistants organisés (mais non-violents) au sein de la communauté juive opprimée en faisant usage de ce moyen si efficace qu'est la religion. Je suis pratiquement certain que Jésus était de bonne volonté en *donnant à croire* aux gens pour les fédérer, et les guider vers la liberté. Mais s'il nous observe depuis lors sur son nuage blanc, je doute que les résultats sur le long terme le satisfassent pleinement.

Chapitre 2

Nous allons maintenant nous atteler à traiter la problématique qui servira de base au raisonnement présenté dans ce livre. Celle-ci devrait sans doute être la première préoccupation de l'humanité, car rien n'a plus d'importance que de la solutionner le plus rapidement possible. Elle s'impose comme une limite physique aux possibilités qui seront offertes aux hommes dans le futur, et forme la pierre angulaire du changement irrémédiable qui caractérisera l'histoire du XXIème siècle.

L'objet de ce chapitre est donc le problème de l'épuisement des ressources énergétiques et minérales, qu'il faut nécessairement compléter d'une étude du réchauffement climatique pour en saisir tous les tenants et aboutissants. Comme nous allons le voir, toute la difficulté de l'affaire réside dans l'impossibilité d'espérer tirer des conclusions intéressantes de raisonnements simples et qualitatifs. La seule voie qui permette d'en évaluer la gravité passe par la physique et par le décompte des réserves, de nos consommations et de ce que nous avons déjà consommé.

C'est pourquoi ce chapitre est un peu technique sur le plan scientifique. J'ai fait de mon mieux pour le rendre le plus intuitif et compréhensible possible par un néophyte, mais son apprentissage peut nécessiter beaucoup de temps et d'efforts (en tout cas ce fut le cas pour moi). Il ne faut surtout pas hésiter à sauter certaines démonstrations ou explications quand elles outrepassent votre niveau. Je suis peut-être parfois plus exhaustif que nécessaire, ce qui est un choix pédagogique tout à fait discutable, mais c'est vraiment par souci d'honnêteté et pour contenter au maximum ceux qui veulent vraiment comprendre les choses en profondeur ; les autres pourront simplement s'affranchir de la possible inintelligibilité qui s'en exhale en éludant ces passages obscurs.

J'avoue avoir écrit cette partie un peu comme j'aurais aimé la lire quand j'ai commencé à m'intéresser au sujet. Mais je n'étais alors pas le moins érudit ; si c'est votre cas il sera peut-être délicat d'assimiler du premier coup les notions qui y seront présentées. Néanmoins, si vous vous contentez de suivre le raisonnement global et d'avancer jusqu'à la fin sans vous préoccuper outre mesure de ce que vous ne comprenez pas, ça devrait bien se passer.

Ce n'est pas un problème d'accepter temporairement des résultats sans savoir précisément comment ils ont été obtenus, quitte à revenir dessus ultérieurement

si vous tenez à vous convaincre de leur bien-fondé. De façon générale, je dirais même que c'est une attitude estimable que d'admettre son ignorance pour accorder sa confiance en les compétences des autres, dans la mesure où ceux-ci s'appliquent à mériter cette confiance en prouvant leur honnêteté. Bien sûr, toute la perspicacité qu'exige cette pratique réside dans la difficulté d'évaluer l'honnêteté de quelqu'un dont on ne comprend que partiellement les dires.

Il arrive plusieurs fois dans ce chapitre que je m'appuie sur des études scientifiques produites par des organisations internationales. Ces papiers ont l'avantage d'être la synthèse du travail d'un grand nombre d'individus, qui se surveillent mutuellement dans leur écriture et cherchent à établir des consensus au sein même de leur communauté. Dans ces conditions et en cas d'erreur, c'est sur tout le corps d'expertise que peut être rejetée la faute, ce qui doit pousser ses membres à redoubler de prudence.

Par humilité plus que par raison, je prendrai ces données pour acquises et ne chercherai pas toujours à les vérifier ; car c'est parfois tout bonnement impossible sans refaire une deuxième fois tout le travail en amont, lequel peut employer des milliers de personnes.

2.1 L'énergie

Ce qui suit immédiatement traite de sujets profonds qui sous-tendent toute la physique depuis Newton. J'irai jusqu'à dire qu'à ma connaissance, personne n'en a la compréhension complète qu'on devrait pouvoir en tirer. Ces résultats émergent de l'essence même de la physique la plus fondamentale qui soit s'il en est ; et nous verrons à la fin de ce livre en quoi ils ne sont qu'un des coins levés du voile qui la cache encore.

L'énergie est une grandeur physique (dont l'unité est le $kg.m^2.s^{-2}$, très souvent notée J pour *Joule*) qui apparaît dans toutes le branches de la physique. C'est une notion qui sera utilisée à profusion dans la suite de ce chapitre. Nous allons maintenant traiter un exemple de mécanique pour l'appréhender.

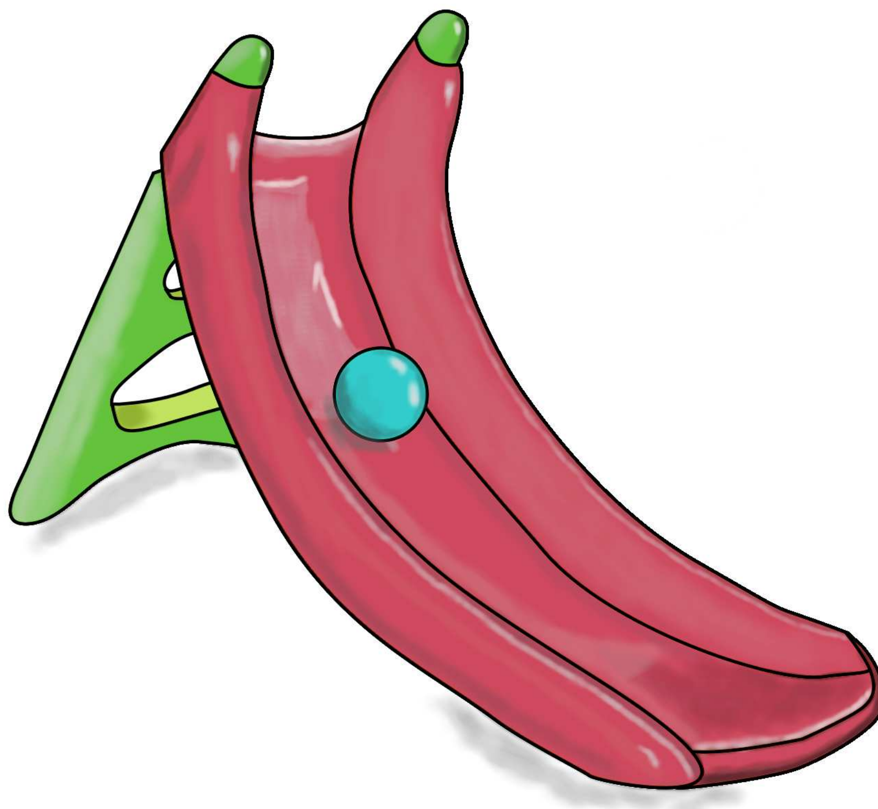
Étudions dans un premier temps le dispositif suivant :



On place une toute petite bille de masse m à une hauteur $h_{départ}$ sur une pente. La bille va commencer à rouler. A la sortie de ce toboggan archaïque, elle aura une certaine vitesse v_{sortie}.

Prenons maintenant une autre bille, avec une autre masse. Le résultat de l'expérience est identique : la vitesse de sortie est la même que précédemment. Ainsi, on peut déjà noter que la vitesse de sortie ne dépend pas de la masse.

Changeons maintenant la courbe du toboggan. On peut accentuer sa pente par exemple (le toboggan sera alors moins long) ou on peut faire un toboggan plus compliqué, avec des creux et des bosses (pas d'angles par contre). On observe qu'à condition que la boule ne soit pas bloquée quelque part, elle sortira toujours avec la même vitesse v_{sortie}.



On peut ensuite essayer de modifier la hauteur $h_{départ}$. Par exemple, on peut faire démarrer la bille à un endroit situé quatre fois plus haut, $4h_{départ}$. On observe alors une vitesse de sortie multipliée seulement par deux ! C'est un résultat très intéressant : si l'on désire doubler la vitesse de sortie, quelle que soit la forme du toboggan on doit quadrupler sa hauteur.

Il semblerait donc qu'il existe un coefficient k tel que $v_{sortie}^2 = k \times h_{départ}$. Cette formule se vérifie pour toute forme du toboggan ; tant que la vitesse de sortie n'est pas trop proche de celle de la lumière.

Avant l'expérience, la bille est à une hauteur $h_{départ}$. Après l'expérience, elle a une vitesse v_{sortie} telle que $v_{sortie}^2 = kh_{départ}$. Qu'est-ce que cela signifie ? D'une certaine façon, c'est un peu comme si tout le kh était *devenu* du v^2. Imaginez d'un coté un réservoir plein qu'on nomme kh et de l'autre un réservoir vide qu'on nomme v^2. L'expérience consiste à verser le contenu de kh dans v^2. Mais alors, à chaque instant il se trouve que la quantité totale v^2+kh est toujours la même, on dit qu'elle est conservée (attention, ici h n'est plus la hauteur de départ de la bille mais la hauteur de la bille à l'instant choisi, et v n'est plus la vitesse de la bille à la sortie du tobbogan mais la vitesse à l'instant choisi).

Quand on descend, le contenu de kh est versé dans v^2. Quand on monte, c'est

le contraire. Vous vous en doutez, la quantité totale v^2+kh qui a la particularité d'être conservée est assimilable à l'énergie qui sera notée E dans la suite (en fait j'ai voulu simplifier les choses, la véritable expression de l'énergie mécanique est $E = \frac{1}{2}mv^2 + mgh$ avec g l'accélération de la pesanteur sur Terre).

Peu importe la formule, en fait. Il ne nous est pas utile de savoir d'où sort ce facteur $\frac{1}{2}$, ou encore de comprendre pourquoi on a tout multiplié par la masse m. Le seul point important, celui que vous devrez nécessairement avoir appréhendé pour aborder sereinement la suite, est le principe de *conservation de l'énergie*. Si vous avez intégré cette fameuse intuition des réservoirs d'énergie qui transvasent, alors c'est tout bon !

Ce qui est vraiment remarquable, c'est qu'on observe des choses analogues à ce qui précède quelque soit le phénomène physique que l'on étudie : la lumière, l'électricité, le magnétisme, le son, la chaleur, etc. On est toujours capable de calculer une énergie, laquelle s'avère toujours conservée !

Mieux encore, quand on veut passer d'un phénomène mécanique à un phénomène dit *électrique* (via un alternateur typiquement) on trouve que l'énergie est une fois encore conservée ! Autrement dit, l'énergie peut *changer de nature*. Tout se passe comme s'il y avait autant de réservoirs d'énergie que de formes physiques qui peuvent l'incarner.

C'est par le biais de cet universalisme que l'énergie acquiert sa place tout à fait exceptionnelle au sein du tableau du monde que contemplent les physiciens. Aucune autre grandeur ne transcende à ce point le cadre d'étude d'un phénomène particulier, à l'exception de la *quantité de mouvement* qui est l'équivalent spatial de l'énergie et dont je toucherai un mot tout à l'heure ; et des variables d'espace-temps elles-mêmes. Nous y reviendrons plus en détail dans le dernier chapitre, quand nous dresserons finalement un état de l'art de nos connaissances en physique.

Quelques fois, l'énergie semble diminuer, par exemple lorsqu'un caillou tombe par terre et s'arrête à l'impact. Pourtant même dans ce cas l'énergie reste conservée : le choc peut avoir produit de la chaleur ou bien même *poussé la Terre*.

Pour le physicien, le principe de conservation de l'énergie est quelque chose d'absolument passionnant. Emmy Noether en a donné en 1918 quelques éléments d'interprétation. Très grossièrement, elle a démontré que dans le cadre de la physique classique la conservation de l'énergie traduit le fait que *les lois de la physique ne changent pas au cours du temps* [54].

Pour l'ingénieur, dont le travail consiste à faire usage de la nature en la guidant pour satisfaire nos désirs, la conservation de l'énergie est l'outil adéquat pour déterminer les possibilités que lui offrent son environnement. Si on lui donne une rivière, un volcan en éruption, une pierre en haut d'une colline, un bois ou un hamster qui court dans sa cage, l'ingénieur sera capable de déterminer ce qu'il va pouvoir en faire avant même de réfléchir au *moyen*. Il saura que quelle que soit son intelligence, il ne pourra jamais s'envoyer en orbite à partir d'une fiente de pigeon en chute libre.

Prenons l'exemple d'un cours d'eau. Si l'on donne à l'ingénieur les caractéristiques physiques de l'eau (ou s'il les mesure), le débit du ruisseau et la bonne formule, il est capable de déterminer la *puissance* notée P, c'est à dire l'énergie

rendue disponible chaque seconde par le ruisseau. Il saura alors qu'*au maximum*, il ne pourra pas tirer pendant un temps Δt plus d'énergie que $P \times \Delta t$. S'il sait quelle est l'énergie qu'il lui faut pour aller sur la lune, il peut déterminer combien de temps cela lui prendra *au minimum* en se servant uniquement du cours d'eau.

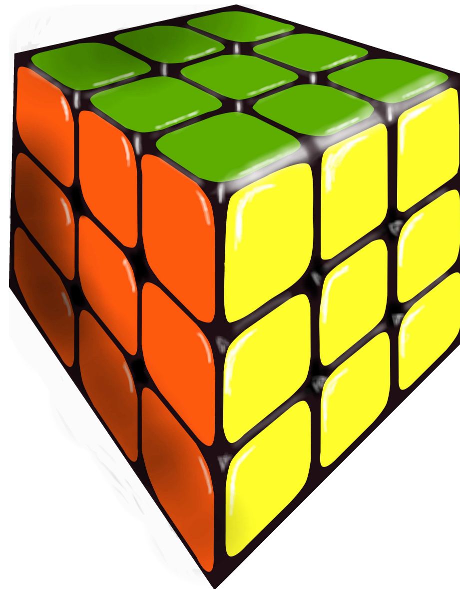
Reste à construire la machine appropriée. Je lui souhaite bon courage.

2.2 L'entropie

Il existe une branche de la physique qui étudie les liens phénoménologiques entre la pression d'un gaz et sa température. Elle porte le doux nom de *thermodynamique*.

La thermodynamique se base sur des principes, qui sont au nombre de deux. Le premier n'est autre que la conservation de l'énergie. J'aimerais vous présenter le second.

Nous allons étudier qualitativement le jouet suivant :



On l'appelle *Rubik's Cube*. Je vais m'en servir pour illustrer ce que les physiciens qualifient de *second principe de la thermodynamique*. Loin de moi l'idée de rédiger un cours de thermodynamique, je vais juste m'efforcer de vous faire sentir cette notion qui est importante pour la suite.

Un Rubik's Cube a, comme tous les cubes, six faces ; mais si par hasard vous envisageriez de vous essayer à le résoudre je vous invite à le voir plutôt comme trois étages, dont vous devriez pouvoir construire les deux premiers sans avoir recours à des techniques particulières. Sur la photo, il est dans un état *ordonné*,

dans le sens où chaque face est monochrome. On peut mélanger le Rubik's Cube, augmentant son *désordre*. *Entropie* est un mot savant pour désigner le *désordre*.

Quand le cube est résolu, il n'est absolument pas désordonné et son entropie est donc nulle. Quand on commence à le mélanger, son entropie va augmenter jusqu'à atteindre une valeur maximale correspondante à une vingtaine de coups. Cela signifie qu'on aura beau le mélanger pendant toute une nuit, il sera ensuite résoluble en vingt coups ou moins.

Le second principe de la thermodynamique dit que l'entropie ne peut pas diminuer. Mon but va maintenant être de vous faire saisir les complications nées de cette affirmation présomptueuse.

Appliquons le second principe au cube. Cela signifie qu'il est impossible de le faire passer d'un état désordonné à un état ordonné. C'est une idée complètement absurde, puisque le but du jeu est justement de le résoudre.

Le second principe de la thermodynamique est donc tout simplement faux.

Maintenant, plaçons-nous dans le cas où ce n'est pas un humain qui manipule le cube mais une machine à mouvements aléatoires. Tantôt elle bouge la face droite, tantôt celle du dessus, tantôt une autre...

Partons du postulat que quelle que soit la position du cube, il y a une séquence qui permette de le résoudre (c'est en fait inexact, mais passons...). Imaginons que cette séquence nécessite au moins 18 coups. Quand la machine fait un mouvement au hasard, ce peut très bien être le premier coup de la séquence en question ! Auquel cas le cube est maintenant résoluble en 17 coups, et l'entropie a encore diminuée.

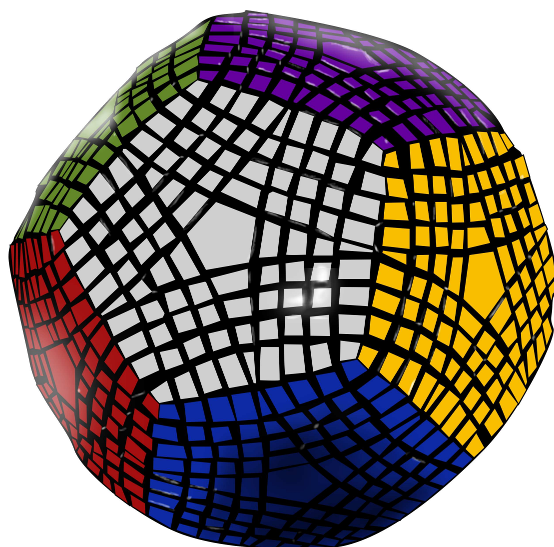
Le second principe de la thermodynamique semble donc définitivement tout à fait faux...

La question qu'on est en droit de se poser est maintenant : combien de mouvements la machine devra-t-elle effectuer en moyenne pour résoudre le cube à partir d'une position initiale aléatoire ? La réponse est de l'ordre de 10^{19} [58]. Il est par conséquent extrêmement ambitieux de chercher à résoudre le cube en faisant des mouvements aléatoires.

Cela est dû au fait qu'il est *peu probable* que la machine fasse le bon coup, celui qui rapprocherait le cube de la résolution. C'est possible, c'est même fréquent quand le cube est très désordonné, mais dès qu'on se place en dessous d'une entropie correspondante à 15 ou 14 coups on a toutes les chances de faire le mauvais coup et donc d'augmenter l'entropie.

Il semblerait donc que lorsqu'on effectue des mouvements aléatoires, l'entropie ait effectivement plus *tendance* à augmenter qu'à diminuer.

Maintenant, qu'est-ce que ça donne pour le jouet suivant ?



Cet objet est beaucoup plus compliqué que le Rubik's Cube. Le nombre de ses positions possibles s'élève à 10^{996} ; ce qui est un nombre ridiculement grand, celui du Rubik's Cube n'excédant pas 10^{20}. Ce nombre est si grand qu'il n'est même pas comparable au nombre d'atomes dans l'univers observable, lequel est estimé à 10^{43}. Du fait de sa complexité énormément supérieure à celle du cube, l'entropie de ce *Petaminx* va avoir *incommensurablement* plus tendance à augmenter qu'à diminuer.

On peut donc faire l'*approximation* que dans le Petaminx, l'entropie ne puisse pas diminuer. C'est bien ce qu'est le second principe de la thermodynamique : une approximation. Comme lorsque je dis que la Terre est ronde alors qu'on y trouve des montagnes, le second principe nous informe sur l'évolution moyenne du Petaminx soumis à de l'aléatoire et néglige les fluctuations possibles.

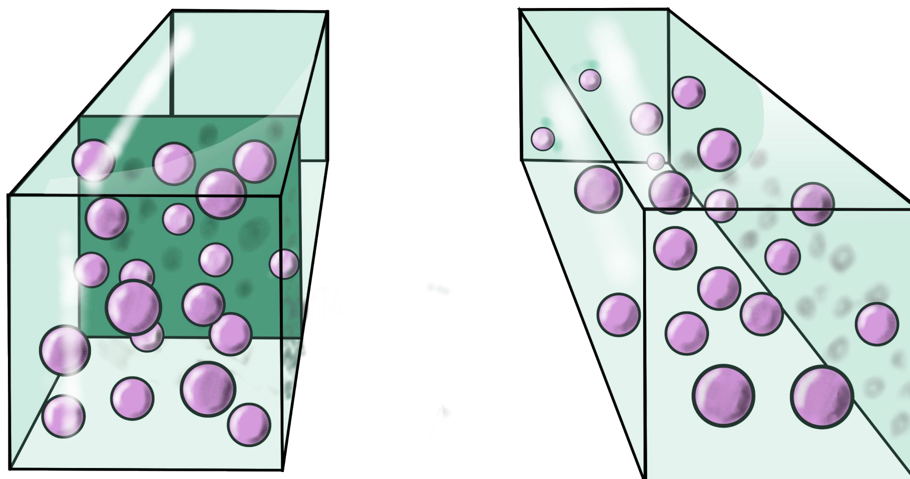
Est ainsi introduite la notion d'entropie. L'entropie, c'est le désordre inhérent à un système complexe aléatoire, et c'est une grandeur qui ne peut décemment pas diminuer.

Bien sûr, ce ne sont pas ces jouets qui m'intéressent dans ce chapitre. Le fameux système complexe qui va nous intéresser, et auquel nous allons appliquer le second principe de la thermodynamique, est un *gaz*.

C'est là que je vais devoir rentrer un peu dans la technique... Si vous avez bien compris comment cela marche avec le cube, ça devrait bien se passer.

Un gaz est un ensemble de molécules que nous allons considérer comme n'interagissant pas les unes avec les autres. Ces molécules sont extrêmement nombreuses et ont un mouvement que nous allons supposer aléatoire (c'est un modèle qui permet de simplifier les calculs, la mécanique de ces molécules est en fait parfaitement déterministe du point de vue classique mais il n'est pas envisageable ni forcément intéressant de calculer l'évolution de leurs positions une à une).

Soit un gaz dans le comportement de gauche d'une boite, le compartiment de droite étant parfaitement vide et la séparation assurée par une cloison :



On peut supposer ce système comme étant ordonné : le gaz est à gauche et le vide est à droite.

On enlève la cloison. Le gaz se réparti dans toute la boite. Les calculs dépassent le niveau auquel j'aimerais maintenir ce texte, mais le résultat est que les vitesses des molécules qui constituent le gaz n'ont pas varié (pourquoi l'auraient-elles fait ?), mais son entropie a augmenté.

Le second principe de la thermodynamique dit cependant qu'une fois que l'entropie a augmenté, on ne peut pas revenir en arrière. Il est impossible de remettre tout le gaz dans le compartiment de gauche puis d'abaisser la cloison sans apporter de l'énergie (pour pousser un piston par exemple) mais alors d'augmenter l'entropie autre part dans l'univers.

Pour être tout à fait clair, il est possible que tout le gaz repasse spontanément à gauche. Mais c'est tellement peu probable que l'on considère que c'est impossible. Voilà l'esprit du second principe.

Ce gaz n'était qu'un exemple d'application du second principe. Ca fonctionne avec tout corps (solide, liquide, gaz) dont les constituants sont en mouvement, bien qu'il faille prendre en compte l'influence de leurs interactions dans les cas plus complexes. On peut également faire de la *thermochimie*, laquelle consiste à appliquer le second principe à la chimie (ce sera sans moi).

J'espère vous avoir fait un peu sentir les idées sous-jacentes au second principe. C'est un exercice extrêmement ardu : la thermodynamique est une des branches de la physique classique les plus difficiles à appréhender. J'aimerais maintenant, sans faire les démonstrations, vous donner quelques exemples de conséquences du second principe.

Il faut bien comprendre que cette notion d'entropie *restreint* les possibilités offertes aux ingénieurs. Concrètement :

— Tout corps possède de l'énergie interne qui est la somme des énergies de ses constituants. Il suffit donc de multiplier le nombre de molécules en présence par leur énergie moyenne (laquelle est toujours donnée par la formule $\frac{1}{2}mv^2$) pour obtenir l'énergie interne du corps. Pour des raisons historiques, on préfère parler de *température* que d'énergie moyenne mais ça ne désigne bien qu'une seule et même chose (à un facteur multiplicatif près) [11].
— Le second principe nous dit qu'on ne peut pas récupérer cette énergie directement (on ne peut donc pas simplement refroidir les océans d'un degré pour faire rouler nos voitures tout en luttant contre le réchauffement climatique).
— On peut récupérer de l'énergie à partir d'une *différence de température* entre deux corps. Mais on ne peut pas récupérer *toute* l'énergie : intervient ce qu'on appelle le *rendement de Carnot* $1 - \frac{T_{froid}}{T_{chaud}}$ avec T_{froid} et T_{chaud} en Kelvin. On voit que plus la différence de température est grande, meilleur sera le rendement.
— On peut à l'inverse utiliser de l'énergie pour *créer* une différence de température. C'est le fonctionnement d'un frigo ou d'une climatisation : la chaleur interne est envoyée à l'extérieur. Mais du coup, si le but était simplement de refroidir les aliments, on perd la partie de l'énergie qui sert à réchauffer la pièce.

Ce fameux rendement de Carnot rend la vie rude aux ingénieurs. J'aurai plusieurs fois l'occasion d'en reparler, mais il s'applique par exemple dans les centrales nucléaires : celles-ci sont toujours construites près d'un cours d'eau qui sert de source froide pour récupérer l'énergie de l'uranium fissionné. Une partie de cette énergie va inexorablement servir à réchauffer le cours d'eau et non à faire tourner l'alternateur : ce sont les pertes de Carnot.

De façon générale, on peut voir le second principe comme la formalisation de la difficulté extrême qu'il y a à réordonner ce qui a été désordonné... L'exemple d'un oeuf brisé dans l'océan se suffit à lui-même.

Soyez sûr d'avoir compris au moins superficiellement ce que sont l'énergie et l'entropie... Nous n'allons parler que de ça à partir de maintenant !

2.3 Transformer notre environnement

De notre point de vue de petits terriens qui n'avons pas accès à des technologies extrêmement avancées, la seule énergie atteignable est celle que contient notre environnement direct. Pas question pour le moment d'aller taper dans les ressources martiennes.

Cette énergie présente sur Terre est multiforme : liaisons chimiques dans nos aliments, vents, cours d'eau... Mais à notre grand bonheur le problème est plus simple qu'il n'y paraît, car tout ce qui sur Terre fait intervenir de l'énergie n'est qu'un produit indirect de seulement quelques sources primaires :

— D'abord, la Terre possède de l'énergie *cinétique*. C'est le petit nom de l'énergie liée au *mouvement*, le $\frac{1}{2}mv^2$ de la bille sur le toboggan. Tout

à l'heure, nous avions négligé la taille de la bille devant les dimensions du toboggan. Ici, le mouvement de rotation de la Terre sur elle-même représente $10^{29} J$ [46]. A titre de comparaison, si la bille de tout à l'heure pesait $100g$ et le toboggan était haut d'un mètre, son énergie cinétique en bout de course n'excèderait pas $1000J$.

— Ensuite, il y a l'énergie *potentielle* de gravitation, c'est le mgh de tout à l'heure. Plus un corps est éloigné de la Terre, plus son énergie potentielle est importante. Quand on s'éloigne trop de la Terre on trouve que mgh est remplacée par une autre formule plus compliquée, mais ça n'a pas vraiment d'importance pour nous à ce stade [43]. L'énergie potentielle d'interaction entre le Soleil et la Terre s'élève à $10^{36} J$, et celle exercée entre la Terre et la Lune, $10^{29} J$ (plus rigoureusement, ces valeurs sont les énergies potentielles récupérables avant que les corps concernés n'entrent en contact).

— Ensuite, l'activité géothermique est causée principalement par la *radioactivité* (on en reparlera bientôt). La puissance considérée n'est plus aujourd'hui si énorme : $10^{13} W$ [38] ; mais la croûte terrestre fait office de couverture, et capture l'essentielle de la chaleur à l'intérieur du *manteau*, lequel se trouve ainsi être le contenant de $10^{31} J$ d'énergie thermique [15].

— Enfin et surtout, un *rayonnement électromagnétique* provient de la fusion nucléaire du Soleil. C'est la lumière visible ainsi que les ultraviolets qui s'y apparentent. Une toute petite fraction de ce rayonnement atteint la Terre et une partie de cette petite fraction est réfléchie, le reste correspondant à $10^{17} W$ soit 10000 fois plus que ce qui survient dans le sol [38]

Voici venir le bilan : nous avons plusieurs réservoirs d'énergie que sont le mouvement de la Terre, les potentiels gravitationnels du Soleil et de la Lune, et l'énergie interne au manteau. Nous avons également à considérer le flux d'énergie en provenance du Soleil et celui qui alimente le manteau par la radioactivité du sol.

En outre, la Terre est en équilibre radiatif, ce qui signifie que toute cette énergie qui arrive à sa surface est réémise sous forme d'un rayonnement qui vient se perdre dans le cosmos. Ainsi, il est vraiment question d'un flux qui trouve sa source dans l'activité nucléaire du Soleil, mais qui ne fait que passer. On peut l'intercepter pour le guider à travers nos machines, mais il finira toujours par quitter la Terre d'une façon ou d'une autre.

Le problème avec les réservoirs d'énergie est double : ils sont souvent inaccessible à nos petites mains d'êtres humains et donc très difficiles à exploiter, et ils ne sont pas infinis.

C'est-à-dire que l'on pourrait imaginer installer une immense courroie tout le long de l'équateur, raccorder celle-ci à la Lune et s'en servir pour entrainer un gigantesque alternateur. C'est complètement infaisable en l'état, mais même si nous y arrivions il n'est pas certain que ce soit une bonne nouvelle... En effet, ce dispositif ralentirait la rotation de la Terre et rapprocherait lentement mais inexorablement la Lune de celle-ci !

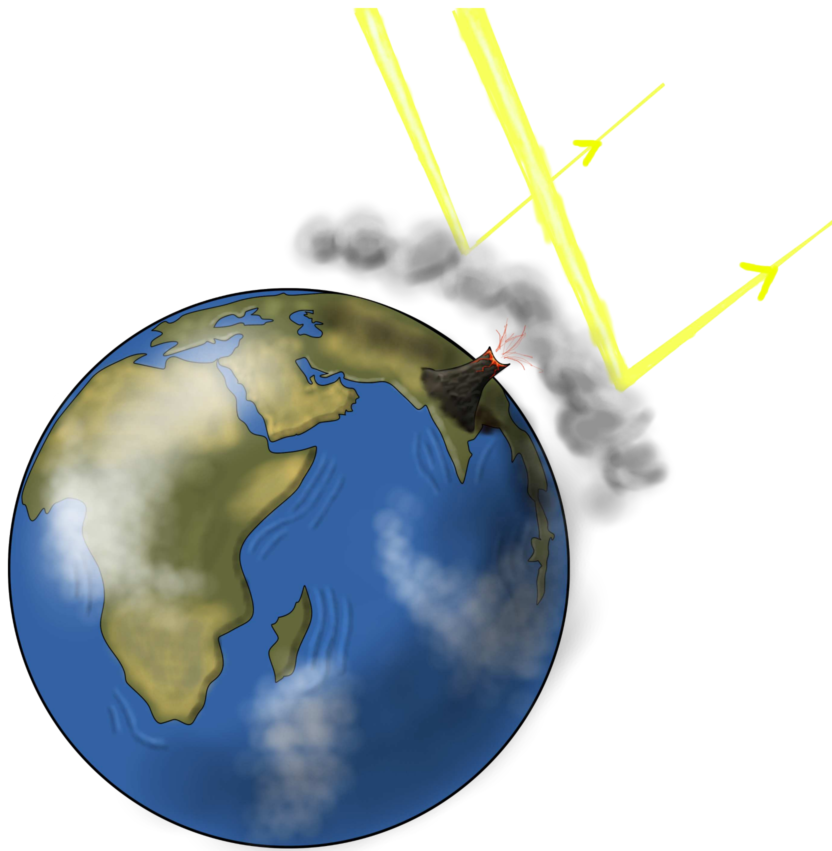
Si vous avez une seule valeur numérique à retenir, ce serait la suivante : l'humanité consomme en 2015 environ $10^{13} W$ moyen [66]. Si nous voulions étancher

cette consommation uniquement par le système de courroie qui vient d'être décrit, on aurait donc le temps de voir venir avant que la lune ne vienne décapiter l'Everest (à notre consommation actuelle cela prendrait trois cents millions d'années). Mais on peut imaginer que si nos activités venaient à augmenter il pourrait s'avérer difficile de retrouver notre autonomie quand la menace serait devant nous. Vous pouvez juger très osé de voir les choses à si long terme, mais j'estime que si l'homme était capable d'un peu plus d'anticipation (certes pas tant) ce serait une large épine extraite de la plante de son pied.

Par contre, on consomme déjà autant que la chaleur qui naît dans le sol sur tout le volume de la planète. Je vous rappelle que l'énergie est une grandeur qui est conservée quand on effectue une modification sur le monde. En ce sens, on peut dire qu'elle quantifie le changement. En extrapolant, on peut donc faire état d'une influence grosso modo aussi grande de l'humanité sur la surface de la planète que la planète elle-même ! Ce serait cependant inexact : seule une infime partie de cette chaleur vient fuiter à la surface. L'homme influe en fait déjà bien plus sur son environnement que la planète elle-même ; et ce de plusieurs ordres de grandeur.

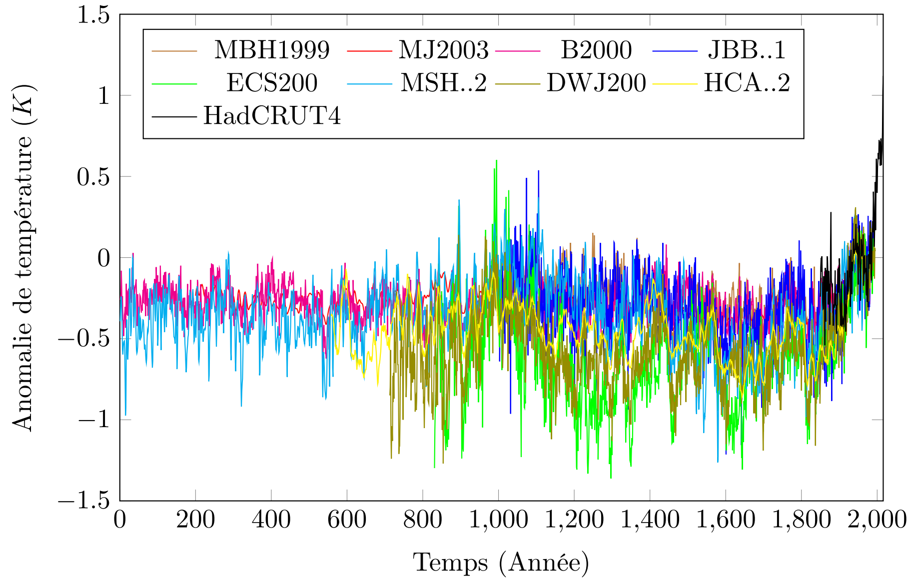
Dans le chapitre précédant - avant que je ne m'égare dans ces considérations scientifiques (qui vont prendre tout leur sens très bientôt) - nous en étions à nous entretenir des périodes les plus reculées de l'antiquité. Or, les trois mille ans qui suivent ne m'intéressent pas forcément pour ce que j'ai à dire tout de suite donc nous allons nous transporter directement au début du second millénaire.

1257, le volcan Samalas en Indonésie est le siège de la plus grosse explosion des sept mille dernières années. La quantité faramineuse de dioxyde de soufre libérée dans l'atmosphère va *réfléchir* (bloquer si vous préférez) une partie du rayonnement électromagnétique en provenance du Soleil. Cet épisode malheureux engendrera un refroidissement climatique mondial appelé *petit âge glaciaire* (car moins d'énergie atteint la surface) qui sera la cause d'un très grand nombre de pertes de récoltes dans les siècles qui suivront.



Il n'est pas étonnant que les populations affaiblies par la famine aient été plus enclines à développer des maladies. C'est probablement un facteur prédominant dans le développement des épidémies de peste qui sévirent principalement de 1350 à 1700 [50]. Voici ce que la communauté scientifique obtient quand elle tente de synthétiser ce qu'elle pense savoir de l'évolution de la température mondiale sur cette période :

Figure 2.1 – Reconstitution de la figure 6.10 du 4ème rapport du GIEC [14][26][21]



C'est un exercice difficile que d'estimer les températures du passé. Nous reviendrons ultérieurement sur ces données, mais on peut déjà dire que toutes ces reconstitutions - qui sont issues ou bien de modèles climatiques simulés, ou bien de mesures sur des anneaux d'arbres ou sur des glaciers - s'accordent à dire que la période 1600-1700 a été particulièrement rigoureuse. Cela s'est traduit par de nombreuses révoltes dans les pays nordiques.

Puis, entre 1700 et 1800, le climat mondial gagne quelque chose de l'ordre de $0.2K$ (à l'avenir je donnerai les températures en Kelvin, mais pour ce qui est des variations c'est la même chose que si elles étaient en Celsius). Dans le même temps, la population mondiale double, ce qui est absolument inédit dans l'histoire de l'humanité.

Pourtant, bien que les découvertes scientifiques de ce siècle soient extraordinaires (thermodynamique, chimie...), celles-ci n'ont pas encore trouvé leurs applications technologiques sinon sous la forme de prototypes qui n'ont pas encore d'impact majeur sur la société. L'agriculture européenne est en pleine restructuration, mais ça ne suffit pas à justifier un tel bouleversement. Toujours en Europe, il est devenu commun de chauffer les habitations avec un mystérieux minerai nommé *charbon*. La fréquence des guerres diminue également, peut-être en partie parce-que les astronomes viennent de décrédibiliser les thèses catholiques sur la place de l'homme dans l'univers (bien que deux-trois gars brillants aient pris feu dans l'opération) [34], mais encore une fois c'est une évolution qui n'est valable qu'en occident. Non, si un évènement mondial doit expliquer le passage de six-cent millions de terriens en 1700 à un milliard en 1800, je ne

vois pour cela que la fin du petit âge glaciaire (mais reste ouvert à d'autres propositions).

Nous en arrivons à la fameuse *révolution industrielle*. 1850, le monde est en plein bouleversement. Les physiciens en arrivent enfin à concevoir un formalisme spécifique et efficace pour la plupart des phénomènes qu'on aimerait étudier. Nous connaissons alors le principe de conservation de l'énergie et le second principe de la thermodynamique. Michael Faraday a également remarqué - sans vraiment le comprendre - le lien étroit qu'il y a entre électricité et magnétisme. Il faudra attendre 1865 pour que James Clerk Maxwell donne le formalisme associé [52].

Au niveau politique, j'imagine que vous serez d'accord avec moi pour dire que c'est un bordel sans nom. En France, peu après avoir coupé la tête de Louis XVI et fait la révolution (on en reparlera), le peuple laisse Napoléon Bonaparte - militaire issu de la haute bourgeoisie - s'autoproclamer empereur. Après la défaite de Waterloo, il finit ses jours exilé sur l'île de Sainte-Hélène. Louis XVIII, frère de Louis XVI, fait de nouveau place sur le trône et meurt en 1824. Après la gouvernance de quelques rois dont tout le monde se fout, un gouvernement provisoire est mis en place.

Il faut noter qu'à cette époque, 85% de la population travaille dans les fermes. Autrement dit, chacun produit de quoi se nourrir, plus de quoi nourrir un petit cinquième de personne. Cependant, de plus en plus de main d'oeuvre est disponible dans les villes.

On trouve des *machines à vapeur* un peu partout en Europe et aux Etats-Unis. Le principe est le suivant : plutôt que de brûler le charbon pour augmenter la température d'un lieu, on va s'en servir pour augmenter la pression d'un gaz ce qui va permettre de mettre en mouvement des mécanismes. On peut alors utiliser ce mouvement comme on le désire : manufacture, transport ou autre. Une telle machine est soumise au second principe comme nous l'avons vu précédemment, une part importante de l'énergie extraite passant directement sous forme de chaleur et non de *travail* mécanique.

Avant la révolution industrielle, quand il fallait se déplacer ou effectuer un travail, la seule solution était d'utiliser notre propre force ou celle d'une bête ; ou encore pour les plus riches celle d'un esclave. Cependant quand on quantifie les puissances mises en jeu, on comprend que ce modèle économique est en train de devenir obsolète : une personne extrèmement entrainée est capable de fournir au plus une puissance moyenne de $150W$ (pour un cheval, ça tourne autour de $400W$), et son travail journalier ne dépasse pas $150 \times 86400 \sim 13MJ$ ce qui correspond à deux grandes bouteilles pleines de charbon [40].

Dans l'optique d'illustrer ça, je vous propose de comparer les puissances qu'ont à disposition Antoine Richepanse, général français du XIIIème siècle, et David Lopez, gens du voyage connu pour ses interventions mémorables sur internet (il fallait bien choisir quelqu'un pour l'exemple !)

Antoine Richepanse	David Lopez
Vingt-six esclaves	Un camping-car de 100ch
$26 \times 150W \sim 4000$W	$100ch \times 736W/ch \sim 74000W$

Si vous approuvez ce qui a été dit jusqu'à présent - et parce-que l'énergie quantifie le changement - vous conviendrez que Antoine Richepanse modifie son environnement environ dix-huit fois moins que David Lopez (c'est très approximatif, ce dernier étant loin d'utiliser son fourgon au maximum de sa puissance à toute heure du jour et de la nuit). Ceci, bien que le premier incarne l'élite de l'aristocratie française et que le second appartienne à une classe sociale très basse.

Ce genre de miracle trouve son explication dans le *pétrole* qui remplit le réservoir de David Lopez. Il diffère du charbon (et par ailleurs du *gaz naturel*) de part son processus de formation propre, mais le principe est toujours le même : tous trois (qu'on englobera sous la terminologie d'*hydrocarbures*) ne sont que les résidus d'organismes ancestraux dont la décomposition a été suspendue (à cause de conditions bien particulières et finalement assez rares) [59]. Ils doivent leurs propriétés étonnantes à de centaines de millions d'années de sédimentation, c'est-à-dire de chauffage à feu doux par la Terre. Autrement dit, les sédiments interceptent une partie du flux de chaleur lié à l'activité géothermique pour la stocker ; devenant ainsi de formidables réservoirs d'énergie.

Le fait que ce phénomène se déroule sur des temps si longs justifie l'extraordinaire *densité énergétique* du pétrole. La puissance que fournit le manteau au sédiment est faible, mais des centaines de millions d'années de maturation auront rendu celui-ci capable de faire flotter des avions.

Ceci explique que pour alimenter une maison moyenne pendant une année ($35 \times 10^9 J$), il faille ou bien 830kg de pétrole brut, ou bien récupérer intégralement la puissance de $15m^2$ de rayonnement solaire à la surface de la Terre (l'intermittence jour/nuit est prise en compte dans ce calcul mais pas les interférences nuageuses) [60]. Et au vu des difficultés rencontrées quand nous cherchons à récupérer ce fameux rayonnement solaire (nous en parlerons plus loin), il est clair que la première solution est largement plus facile à mettre en oeuvre.

Ou alors, on peut se contenter d'un milligramme d'Uranium 235.

2.4 Agir sur l'atome

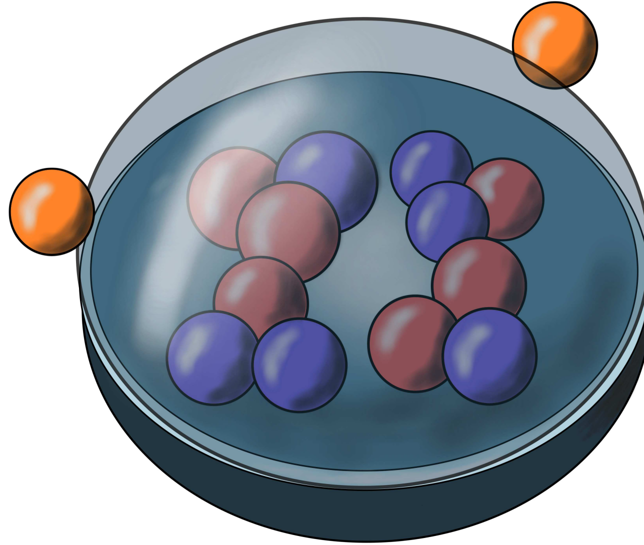
La lecture de cette section n'est absolument pas indispensable pour la compréhension de la suite. Elle constitue une description de ce qu'il advient lors d'une réaction nucléaire, et est clairement destinée au lectorat averti. C'est pourquoi je vous invite sérieusement à envisager de sauter plusieurs pages si ce qui suit vous semble incompréhensible (avec la garantie que vous ne raterez rien important).

Un hydrocarbure est formé d'organismes sédimentés qui ont subit des transformations thermochimiques à cause des fortes températures auxquelles ils furent exposés pendant des millions d'années. La forme d'énergie qui intervient ici est donc dite *chimique* - en allusion aux liaisons qui assemblent les atomes en molécules.

Un atome est en fait un agglomérat de particules nommées *quarks* qui forment le *noyau*, lequel est entouré d'*électrons*. Les quarks existent communément sous deux formes : *up* (chargé électriquement $+2/3$) et *down* (chargé -1/3). C'est leurs nombres respectifs qui déterminent la nature de l'atome (l'Hydrogène 1 a par exemple deux up et un down, l'Hélium 4 possède six up et six down).

La charge électrique - qui est à la base de l'électromagnétisme (et donc de l'électricité) - est une quantité conservée.

La physique des quarks est quelque chose de très compliqué et d'encore assez obscur. Je ne m'étendrai pas sur ce sujet que je connais mal. Vous avez simplement à savoir qu'on peut simplifier le problême en assimilant le noyau à un agglomérat de *triplets* de quarks plutôt que de quarks eux-même. Les deux triplets possibles sont up,down,down qu'on appelle *neutron* (électriquement neutre) et up,up,down qu'on appelle *proton* (chargé $+1$). On englobe ces deux particules sous le nom générique de *nucléon* (étymologie de *nucléaire*).



C'est le nombre de protons qui détermine l'élément associé à l'atome (Hydrogène, Carbone, Azote, Uranium ou autre) tandis que la somme du nombre de neutrons et du nombre de protons donne le *numéro isotopique*. Par exemple, l'Hydrogène 2 ou Deutérium possède un proton et un neutron. L'Hydrogène 3 ou Tritium porte un proton et deux neutrons.

Le noyau est entouré d'*électrons* (chargés -1). Il y a usuellement autant d'électrons que de proton, annulant la charge totale de l'atome.

Quand on parle de liaison chimique, on fait allusion à des électrons dont l'onde quantique chevauche deux noyaux atomiques [35]. Autrement dit, ces électrons sont *mis en commun* à deux atomes.

Je n'ai pas encore parlé de physique quantique. Celle-ci trouvera une partie qui lui sera dédiée dans le dernier chapitre de ce livre. En attendant, vous pouvez la considérer comme une complication étrange des comportements de la matière à l'échelle subatomique et en accepter simplement les quelques conséquences dont j'aurai besoin par la suite.

Il existe une manifestation macroscopique de ce genre de phénomène quantique qui fait intervenir deux atomes (même si l'on ne peut pas proprement parler de liaison chimique) : le Gecko est un lézard qui a la faculté très surprenante de pouvoir escalader des murs verticaux à grande vitesse et même de se suspendre aux plafonds. Il ne possède ni crochet, ni ventouse mais des lamelles microscopiques qui ont pour seul but de maximiser la surface de contact entre ses pattes et le support. Les électrons des atomes très proches voient leurs ondes quantiques interagir et se déformer, ce qui engendre une force électrique attractive dans le but d'empêcher l'animal de tomber [65].

On ne peut pas appliquer l'électromagnétisme du XIXème siècle aux atomes en espérant obtenir les bons résultats. Pourtant, il reste vrai en mécanique quantique que deux particules chargées électriquement de même signe (deux protons par exemple) devraient se repousser. Ainsi, le noyau atomique n'a pas de raison d'exister si l'on ne prend pas en compte une nouvelle interaction qui ne s'applique qu'aux quarks : l'interaction forte. Celle-ci ne peut être étudiée qu'à travers la physique quantique, et c'est très difficile [67]. Cependant, il y a de l'énergie qui intervient quand on s'intéresse à l'interaction forte ; ce qui va permettre comme toujours de simplifier nos études. De notre point de vue d'observateur extérieur, cette énergie prend la forme de *masse*.

La masse est une chose extrêmement mystérieuse. Depuis la découverte du *Boson de Higgs* en 2012, on peut dire qu'en un sens elle est la manifestation de l'interaction de la matière avec un champ qui emplit le vide (lequel n'est du coup pas vide) [44]... ce qui n'est pas très éclairant, j'en conviens tout à fait. Du point de vue classique, la masse est la grandeur qui représente la *résistance au changement* : c'est à cause de leur différence de masse qu'il est beaucoup plus difficile de modifier le mouvement d'une planète que celui d'une balle de tennis. Il n'y avait pas de masse aux premiers instants de l'univers, à cause de l'inexistence du champ de Higgs, et toute la matière se déplaçait donc à la vitesse de la lumière [24][39].

Pour votre parfaite information, cette vision dite *inertielle* de la masse - où celle-ci coïncide avec la résistance au changement - est formalisée elle aussi par le Théorème de Noether dont nous avions dit qu'il traduisait la correspondance entre la conservation de l'énergie et la symétrie temporelle des lois physiques. Cette fois-ci, la grandeur conservée s'appelle *quantité de mouvement* et la symétrie se rapporte à l'espace : *les lois de la physique sont partout les mêmes*.

Cependant, à l'issue d'une longue histoire qui fera elle aussi l'objet d'une partie au sein du dernier chapitre de ce livre, Einstein aboutit à une forte relation entre la masse est l'énergie : $E = mc^2$ (avec E l'énergie, m la masse et c la vitesse de la lumière). Cette formule nous dit que la masse est une forme d'énergie, au même titre que la chaleur ou le potentiel gravitationnel. Or, l'énergie issue de l'interaction forte qui lie les quarks au sein des noyaux atomiques prend précisément cette forme-ci.

Autrement dit, s'il était possible de *casser le noyau* (et nous allons voir que c'est le cas), des liaisons nucléaires devraient être brisées et la masse correspondante prendre une forme d'énergie peut-être exploitable pour l'homme. C'est précisément ce qui arrive dans une réaction nucléaire : de la masse se transforme en énergie cinétique.

En fait, beaucoup de noyaux ont à chaque instant une probabilité non-nulle de se désintégrer, de se disloquer, du fait des principes de la mécanique quantique qui régissent l'*effet tunnel*. C'est la radioactivité α. Un noyau d'Uranium 235 a par exemple une chance sur deux de libérer un noyau d'Hélium 4 au bout de 700 millions d'années (on parle de *temps de demi-vie*). L'énergie rémanente à la liaison brisée donne au noyau d'Hélium 4 une vitesse de plusieurs millions de m/s ! Subsiste alors un noyau de Thorium 231.

Le Thorium 231 est soumit à la radioactivité $\beta-$ (avec une demi-vie de 25

heures), laquelle fait intervenir la dernière interaction fondamentale dont nous n'avons pas encore fait référence : *l'interaction faible*. Il s'agit d'un quark up qui se transforme en quark down avec émission d'un boson W-, lequel va rapidement se désintégrer en un électron et un *antineutrino* (oui il y a beaucoup de particules élémentaires). Si vous avez suivi, vous remarquerez que remplacer un quark up par un quark down revient à supplanter un neutron à un proton. Le Thorium 231 devient donc du Protactinium 231 qui lui-même est soumit à la radioactivité α avec une demi-vie de trente-deux mille ans.

Si vous ne vous êtes jamais intéressé à la physique des particules avant, je pense que vous devez être complètement perdu ; un bilan s'impose donc. Je vous présente le modèle standard de la physique des particules :

FIGURE 2.2 – Modèle standard de la physique des particules

On voit dix-sept particules dans ce tableau, mais on peut déjà en ajouter une douzaine. Les six quarks (en violet) et les six *leptons* (en vert) possèdent en effet tous un alter ego : ce sont les anti-particules dont la charge est opposée. On peut donc parler d'*anti-quark up* (chargé -2/3), d'*anti-électron* (chargé +1), etc.

Vous retrouvez dans la colonne de gauche le quark up et le quark down qui forment le noyau atomique, l'électron qui gravite autour du noyau et le neutrino (dont l'antiparticule est l'anti-neutrino, même si la question de savoir si neutrino et anti-neutrino sont bien deux particules distinctes n'est pas tranchée). En ce

qui concerne les deux colonnes suivantes, les physiciens se demandent encore à quoi ça rime... Elles sont analogues à la première colonne et beaucoup de questions sont ouvertes à leur propos. Nous avons ensuite les bosons de jauge, qui sont associés aux interactions dont nous avons parlé précédemment : le photon véhicule l'électromagnétisme (c'est donc la particule de la lumière), les huits gluons (on n'en voit qu'un dans ce tableau mais il y en a en fait huit) s'occupent de l'interaction forte et donc de contenir les quarks dans le noyau (ce sont eux qui disparaissent lors d'une désintégration α) ; enfin les bosons Z, W+ et W- (oui il y a deux W) sont vecteurs de l'interaction faible. Comme je l'ai dit, le boson de Higgs a une place un peu à part.

Il y a donc en tout au moins trente-quatre ou trente-sept particules élémentaires (suivant que l'on compte les anti-neutrinos ou non). Mais rien n'est figé : nous n'avons exploré dans les accélérateurs de particules que des niveaux d'énergie relativement bas et de nouvelles choses pourraient très bien se révéler plus tard. Les physiciens envisagent d'ailleurs l'existence d'autres particules dans les cadre de théories comme la *supersymétrie*, de plusieurs bosons de Higgs, ou bien d'un hypothétique *graviton* qui serait le reflet de la gravitation dans le cadre de la physique quantique (nous verrons que c'est LE sujet qui taraude les physiciens).

On est bien d'accord que tout ceci est très compliqué... La vraie question étant de savoir ce qui se cache derrière. Le modèle standard est le fruit d'une théorie pointue - la *théorie quantique des champs*, qui étudie les objets à la fois rapides et petits - mais surtout très mathématique, ainsi que d'expériences extrêmement difficiles à mener. C'est une grande réussite, mais cette mathématisation totale nous fait écran dans le sens où elle ne nous permet pas d'imaginer des interprétations satisfaisantes. Je pense que nous sommes en droit d'espérer trouver un jour un moyen élégant et concret de traiter le problème.

A ce stade, j'ai bien conscience d'avoir laissé sur la touche la majeure partie de mes lecteurs. C'est sans espèce d'importance, puisque nous ne reviendrons pas sur ces éléments avant la toute fin du livre (nous aurons d'ici là parlé de plein d'autres choses - je l'espère - très intéressantes et bien moins sophistiquées). C'est probablement un choix très discutable que d'avoir souhaité introduire ces éléments de physique ici ; et si je l'ai fais c'est plus pour suivre l'ordre naturel des choses que par nécessité.

Revenons donc à nos moutons nucléaires. Nous avons vu que l'Uranium 235 peut naturellement subir une désintégration α pour donner un noyau d'Hélium 4 à haute énergie et un noyau de Thorium 231, lequel va à son tour subir une désintégration $\beta-$ pour donner du Protactinium 231 et un boson $W-$; ce dernier se désintégrant très rapidement en un électron et un anti-neutrino.

Cependant, il existe un autre moyen de briser un noyau d'Uranium 235. Il s'agit de provoquer la collision du noyau d'Uranium 235 avec un neutron : c'est la *fission induite*. Le résultat de cette collision dépend de l'énergie du neutron incident, mais on peut par exemple obtenir du Krypton 93, du Baryum 140 et trois neutrons. S'il n'y avait qu'un seul atome d'Uranium, ces particules à haute énergie effectueraient de multiples collisions avec leur environnement ; les différentes vitesses des particules en présence s'uniformiseraient et la température

ambiante augmenterait. Mais s'il est entouré de suffisamment d'autres atomes d'Uranium 235, il est probable que les trois neutrons rapides viennent frapper d'autres noyaux et provoquer d'autres réactions de fissions. A partir du moment où la fission d'un noyau d'Uranium 235 provoque en moyenne la fission d'au moins un autre noyau d'Uranium 235, on parle de *réaction en chaîne*.

6 août 1945, 8h15, au dessus d'Hiroshima. L'engin connu sous le nom de code *Little Boy* est en chute libre. Il embarque deux morceaux d'Uranium enrichi, très denses en Uranium 235. De temps en temps, une fission spontanée a lieu dans l'un des deux morceaux mais les caractéristiques des morceaux d'Uranium (masse, densité, géométrie...) empêchent les neutrons libérés d'enclencher une réaction en chaîne.

L'altimètre embarqué dans la bombe vient de mesurer une pression ambiante supérieure au seuil réglé par les ingénieurs (dans l'optique de maximiser les dégats). La cordite placée à l'arrière de l'appareil explose et projette l'un des morceaux contre l'autre. Cette fois-ci, la réunion des deux morceaux d'Uranium rend possible la réaction en chaîne. Il n'y a plus qu'à attendre la prochaine fission pour rompre la cohésion de 10^{23} noyaux d'Uranium 235 [49][64] et transfomer la masse des liaisons correspondantes en onde acoustique et chaleur ; provoquant du même coup la mort d'au moins soixante-dix mille personnes.

La seule différence entre Little Boy et un réacteur nucléaire récent, c'est que dans le réacteur nucléaire on s'applique à faire en sorte que chaque noyau provoque en moyenne la fission d'exactement un autre noyau. Ainsi, on dit que la réaction est contrôlée : elle ne disparaît pas d'elle-même et elle ne s'emballe pas (sauf lors de quelques rares mais graves occasions).

C'est une chose merveilleuse que l'homme ait appris à maîtriser une telle chose, qui est l'application directe d'une physique totalement inaccessible à nos sens. Cependant, il est à mon sens extrêmement préoccupant que nous ayons choisi de nous en servir massivement. Mon avis est que l'on devrait y réfléchir à deux fois avant d'user de ce genre de procédé qui ne donne absolument pas le droit à l'erreur.

Car l'erreur est humaine. Les épisodes bien connus de Tchernobyl et Fukushima sont là pour nous le rappeler. Alors, certes, il est possible que ce genre de drame ait une faible probabilité d'arriver avec les centrales les plus récentes. Mais pouvons-nous nous permettre ce risque, aussi faible soit-il, dans la mesure où aujourd'hui il est avéré que les radionucléides (élements radioactifs déposés dans l'environnement) ingérés par les populations vivantes à proximité du site de Tchernobyl sont en train de faire muter leur génome [25] ? Les résultats d'experiences menées sur des papillons nourris avec des feuilles prélevées à Fukushima sont spectaculaires [3]. Les génomes de toutes les espèces sont en train d'être altérés. C'est tout à fait inédit. Je ne peux pas imaginer les conséquences à long terme d'une telle chose.

Peut-être que la sélection naturelle règlera le problème d'elle-même (qui pourrait l'affirmer avec certitude ?), mais combien seront morts prématurément d'ici là (même dans l'hypothèse où aucun autre accident majeur n'ait lieu) ? Si l'on vous laissait le choix entre des GWh électriques et des vies humaines, que choisiriez-vous ? Les vies bien sûr, seulement on ne vous pose jamais la question

de cette façon.

Quoi qu'il en soit, il est clair pour moi que l'usage massif de la fission nucléaire est un comportement parfaitement déraisonné. Avec Little Boy et Fat Man nous avions deux expériences menées à grande échelle qui nous montraient que même avec des quantités d'Uranium 235 relativement faible, les dégats immédiats pouvaient êtres désastreux. Nous n'avions absolument aucune idée de ce que la contamination radioactive d'un site pouvait donner sur le long terme, mais sûrement rien de bon (aujourd'hui on est à peine plus éclairé sur la question).

J'ai pensé que je pourrais inventer un dicton pour l'occasion. Pas sûr d'avoir réussi l'exercice, mais le voici néamoins :

On peut être sage et ignorant : il suffit de prendre ses précautions. On peut être sage et en savoir peu : il suffit encore une fois de prendre ses précautions ; y compris si le peu qu'on en sait est rassurant. Mais si le peu qu'on en sait est très inquiétant et que pourtant l'on choisi de faire preuve de témérité, nous sommes de parfaits inconscients.

Mais nous sommes partis du principe qu'il suffisait de faire en sorte qu'il n'y ait pas d'accident pour qu'il n'y en ait pas. Et l'URSS a suivi, pas question de passer à côté d'une technologie aussi efficace en pleine guerre froide. Il faut les comprendre, sans ça ils avaient peur de ne pas être à la hauteur en cas d'attaque américaine. Sauf qu'ils se sont plantés. Et d'ailleurs, les américains ont attaqué un peu partout pour limiter l'expansion du régime soviétique. Il faut les comprendre, ils avaient peur du nucléaire russe.

La sagesse est définitivement incompatible avec la guerre. Et l'absence de sagesse n'est plus tolérable, à une époque où l'on n'arrive plus à prendre conscience de l'ampleur des effets que peut avoir la technologie que l'on pense maîtriser si elle est mal utilisée ; bien qu'on sache que ce soit *à minima* dramatique.

Tout ça pour dire que le coeur du problème est une fois encore le théorème de Nash, qui empoisonne nos vie ; ou les irradie devrais-je dire....

2.5 L'épuisement des ressources

J'espère que vous aurez retenu de ce qui précède (je me calme pour un temps avec les apartés trop longs sur la physique, promis) que l'homme a appris au cours du XXème siècle à transformer artificiellement un atome en un autre atome. Ce qui nous permet de réaliser le vieux rêve des alchimistes : changer le Plomb en Or. Il suffit pour cela de prélever trois protons, et huit neutrons afin que l'Or ne soit pas radioactif [45]. Cependant pour des raisons que je ne développerai pas ici, comme le plomb et l'or ne sont pas des éléments particulièrement lourds (contrairement à l'Uranium) ça demande d'apporter beaucoup d'énergie (alors que pour l'Uranium c'était l'inverse : on récupérait de l'énergie lors de la fission), ce qui rend le procédé non rentable économiquement [61].

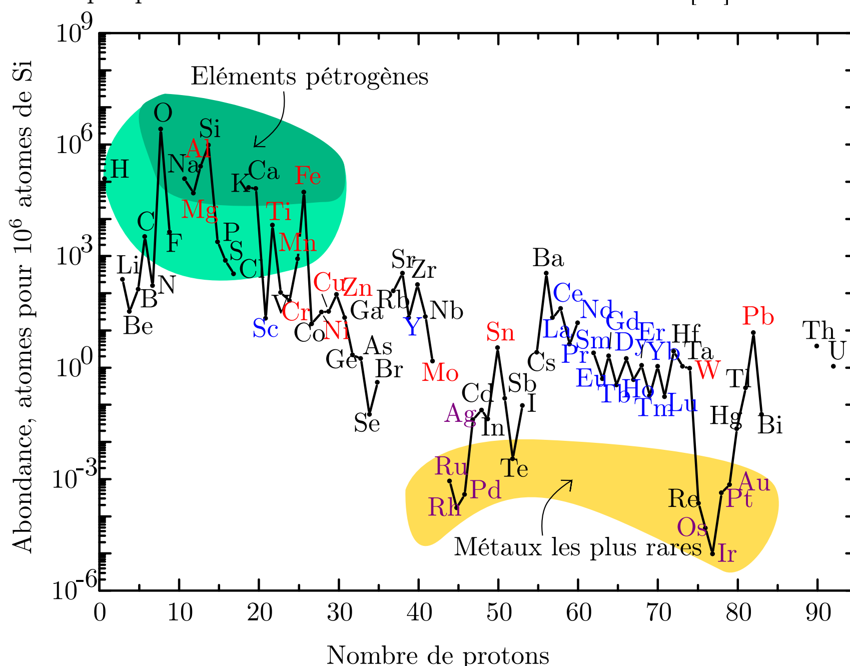
Bref, il n'est pas envisageable d'utiliser la physique nucléaire à tout bout de champ pour transformer une ressource que nous avons à profusion (l'eau de mer par exemple) en n'importe quoi de plus rare. En fait on peut considérer que le

nucléaire est une technologie non applicable dès qu'on s'intéresse à des masses supérieures à quelques tonnes.

Voyez-vous où je veux en venir ? Nous avons un stock sur Terre d'atomes aux éléments chimiques bien déterminés, et ce stock est *grossièrement fixé une fois pour toutes*, dans le sens où il est bien trop difficile de transformer des atomes en d'autres atomes pour l'arranger massivement.

Par contre nous pouvons diminuer ce stock, par exemple en cassant les molécules d'eau (là encore il faut apporter de l'énergie) et en libérant le dihydrogène. Celui-ci - plus léger que l'air - va s'élever au sommet de l'atmosphère [27] pour à terme littéralement quitter la Terre [8]. Mais bon, étant donnée toute l'eau qu'il y a sur Terre, on a le temps de voir venir avant que ça ne pose le moindre problème.

Il y a quelques éléments chimiques qui sont disponibles à profusion : Hydrogène (dans l'eau), Carbone (sous forme de dioxyde de carbone dans l'atmosphère), Azote (dans l'atmosphère également), Oxygène (dans l'atmosphère et dans l'océan), Sodium et Chlore (qui à eux deux forment le sel), Silicium (qui compose le sable), Soufre (pas très accessible cependant), Fer dans une moindre mesure et quelques autres moins utiles aux activités humaines [13] :



Pourtant, nous utilisons massivement des ressources minérales jugées rares sur Terre, ce qui demande de creuser profondément. Cela n'est permis que dans un monde où un accès facile à l'énergie est assuré. Voilà pourquoi on peut considérer les extractions minières antérieures à la révolution industrielle comme tout à fait négligeables.

Cependant, nous extrayons aujourd'hui beaucoup de matière première des

sols. Heureusement, les atomes ne sont jamais perdus sauf quand ils échappent à l'attraction terrestre. Il faut néanmoins garder à l'esprit l'affaire de l'oeuf brisé, qui traduit la difficile réversibilité de l'épandage de ces matériaux rares. En effet, il est indubitablement beaucoup plus facile de récupérer un kilogramme d'Argent sous forme de veine dans les mines que ne serait-ce qu'un gramme de fer issu de l'épave d'un bateau après que celui-ci ait corrodé au fond d'un lac et soit totalement dissous. L'homme désordonne inévitablement les quelques filons de métaux rares qu'il trouve, et rend de plus en plus difficile leur usage. Car bien sûr, petit à petit, recyclage après recyclage on disperse un peu de matière dans les sols, dans l'atmosphère ou dans l'océan.

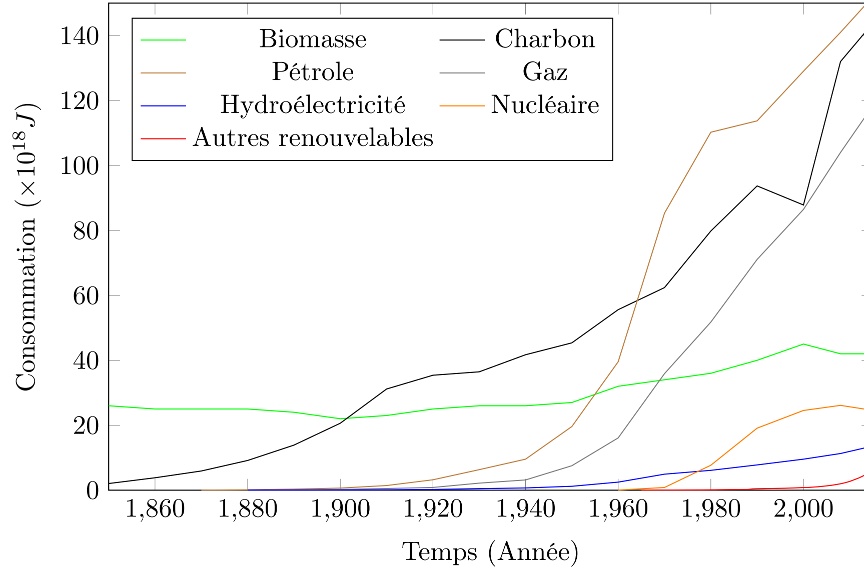
Un jour, certes dans longtemps, nous n'aurons plus accès à tous les éléments auxquels nous avons accès aujourd'hui. Alors pourquoi s'échiner à exploiter jusqu'au dernier gisement, à en profiter au maximum ? M'est avis que nous devrions au contraire tout de suite envisager de nous en passer, et trouver des solutions substitutives. L'exploitation des minerais rares est un désastre écologique, produit d'une vision follement court-termiste.

Ce problème d'épuisement des ressources minérales est d'un certain point de vue analogue au problème énergétique : le nombre d'atomes de chaque élément chimique sur Terre est grossièrement conservé tout comme l'est l'énergie, mais à mesure que le temps passe les atomes se dispersent et il peut devenir de plus en plus difficile de les récupérer, tout comme l'augmentation de l'entropie rend de plus en plus difficile l'exploitation du stock d'énergie.

Seulement, la différence de taille entre les deux est que de l'énergie nous est apportée par le Soleil à chaque instant ce qui permet d'en lentement renouveler le stock ; alors que ce n'est pas les cas des atomes.

Nous allons enfin entrer dans le vif du sujet. Il s'agit dans cette partie de quantifier nos vitesses d'extraction des différentes ressources accessibles, en vu de déterminer s'il est envisageable ou non de continuer ainsi pendant encore très longtemps. Pour éviter de vous assommer avec une présentation trop complète, je me restreindrai à étudier le problème énergétique et laisserai le sujet des minerais de coté. Les conclusions ne sont pourtant pas vraiment sensiblement analogues, mais j'ai fait ce choix pour éviter de rendre vraiment indigeste par son exhaustivité ce chapitre quelque peu rébarbatif.

FIGURE 2.3 – Reconstitution de l'historique du mix énergétique mondial [20][4]



Avant la révolution industrielle, la majeure partie de l'énergie utilisée par l'homme se limitait à la combustion du bois dans les cheminées. C'est encore de l'énergie solaire absorbée par des organismes ; en l'occurrence des végétaux.

On peut voir le bois comme la quintessence des énergies renouvelables. Pourtant, aussi évident que cela puisse paraître, il faut préciser que le bois n'est renouvelable que si l'on replante un arbre après l'avoir coupé. A l'aube de la révolution industrielle, les forêts européennes étaient d'ailleurs en voie de disparaître.

C'était sans compter sur le charbon, qui est venu supplanter en partie le bois pour le chauffage, mais qui a surtout permis de mettre en branle des machines qui viennent assister largement les hommes dans leurs activités. Ceci explique que les vitesses d'extractions minérales étaient quasi-nulles avant cette époque, car nous n'avions pas les moyens techniques d'aller chercher les gisements profonds. Voilà pourquoi l'épuisement des ressources minérales et celui des ressources énergétiques ne sont que deux facettes d'un même problème.

Puis le pétrole s'est avéré beaucoup plus efficace pour des applications comme le transport... Les gisements de gaz qui l'accompagnent ont pu être exploités également.

Enfin, au début du XXème siècle, on envisage de mettre en place des réseaux de distribution de l'électricité. On parle alors de seconde révolution industrielle mais du point de vue physique il n'en est rien : l'énergie est toujours majoritairement extraite des hydrocarbures (charbon, pétrole, gaz) et elle est simplement transformée en électricité avant de venir actionner des machines. C'est certes plus pratique, mais ça ne fait qu'ajouter un intermédiaire.

Et puis, l'utilisation de sources alternatives s'est faiblement développée. On

s'est dit qu'il pourrait être intelligent d'utiliser les techniques modernes pour améliorer le vieux modèle du moulin à eau, et produire de l'électricité. Cependant, des moulins à eau n'ont jamais permis d'apporter de grosses forces de travail, de nature à concurrencer les hydrocarbures, sinon la révolution industrielle aurait eu lieu bien avant.

Il y a aujourd'hui des barrages hydroélectriques sur presque tous les grands cours d'eau de la planète. Des peuples indigènes en souffrent beaucoup, car cela a un impact extrême sur l'écoulement. Et comme vous pouvez le voir sur le graphique un peu plus haut, leur part dans le mix énergétique est faible en comparaison des hydrocarbures.

Et puis, il y a le nucléaire. Contrairement à l'hydroélectricité, le nucléaire est une source d'énergie de niche, réservée aux pays développés. La France est une exception dans sa consommation d'énergie nucléaire. Le parc nucléaire mondial est constitué de 450 réacteurs, qui produisent à eux seuls plus que les 58000 grands barrages de la planète [1][7].

Et enfin, les renouvelables au sens où on l'entend couramment : photovoltaïque, solaire à concentration, éolien, hydrolien, géothermie, etc... Nous aborderons rapidement le fonctionnement de chacune de ces technologies, mais on peut déjà dire qu'elles ont en commun le caractère de se baser directement sur des sources d'énergies très généreuses : la lumière du Soleil, la chaleur de la Terre, le travail mécanique des courants, etc... Chacune de ces sources d'énergie peut, si elle est exploitée au maximum ce qui n'est ni envisageable ni souhaitable, satisfaire à elle seule plusieurs millions de fois ce que l'humanité consomme. C'est en ce sens qu'on dit que ces énergies sont renouvelables, qui est donc un terme employé très incorrectement. En fait, aucune source d'énergie n'est renouvelable au sens premier du terme. Faute d'hydrogène à fusionner, le Soleil s'éteindra inévitablement, tout comme les combustibles fissibles du sol finiront par se târir.

L'usage exclusif de ressources *abondantes* (qui est une appellation que je trouve plus appropriée) est donc la seule voie durable, l'épuisement des ressources dites *fossiles* comme les hydrocarbures étant inévitable. Ce peut sembler une évidence, mais c'est une chose qu'on a intuitivement beaucoup de mal à visualiser car les secondes sont omniprésentes dans notre quotidien. Un monde dans lequel l'usage des ressources fossiles serait exclu est si difficile à imaginer qu'on préfère faire aveuglément confiance au génie humain pour trouver le moyen de s'affranchir du problème.

Des tentatives de développement de technologies nouvelles pour extraire l'énergie de ressources abondantes sont bien sûr en cours. On peut citer la *fusion nucléaire* comme un cas d'école. L'idée est de combiner des atomes légers comme les isotopes de l'Hydrogène (un proton et quelques neutrons) pour donner des atomes moins massifs que la somme des parties. C'est vraiment la même chose que la fission, mais à l'envers et pour des éléments légers. Encore une fois, $E = mc^2$ s'applique.

On pourrait alors penser que finalement, il n'y a pas matière à s'inquiéter outre mesure. Et ce serait le cas si l'échéance était suffisamment lointaine pour permettre un grand nombre de révolutions conceptuelles et technologiques

d'avoir lieu d'ici là, de sorte que ce futur soit imprévisible. Mais est-ce vraiment le cas ?

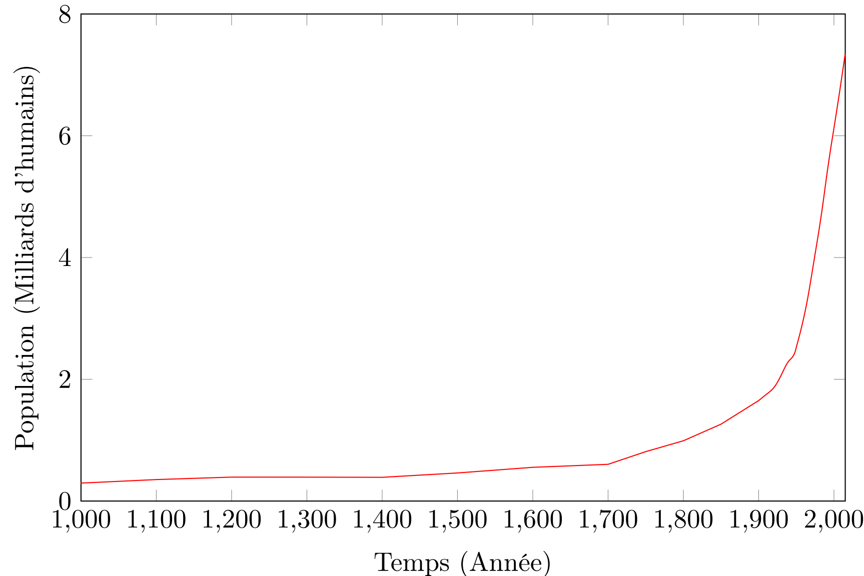
Pour répondre à cette question, il va falloir s'atteler à quantifier les ressources fossiles que contiennent encore les sols. C'est un travail difficile, qui emploie des milliers de personnes de par le monde. Tous les acteurs de ce corps de métier s'accordent à dire qu'il leur est très difficile d'arriver à un consensus étant donné les incertitudes importantes sur la prévision des découvertes de gisements à venir, et même sur la production passée (du fait de l'opacité des statistiques fournies par bon nombre de pays pétroliers). Cependant, si nous voulions vraiment donner un ordre de grandeur susceptible d'être représentatif de ces travaux, on pourrait dire que l'humanité a déjà consommé quelque chose comme la moitié des réserves de pétrole [18][55].

Pour le gaz et le charbon, c'est encore un peu plus compliqué à estimer mais les réserves sont probablement plus importantes (en faisant preuve d'optimisme on peut tabler sur quelque chose de l'ordre du siècle d'exploitation pour le gaz et plus encore pour le charbon, sur la base de la consommation de l'année 2014 ce qui ne peut aucunement être représentatif de la réalité mais reste assez parlant). Cependant, nous verrons dans la prochaine section pourquoi il faut concentrer tous nos efforts à réduire à zéro la consommation en charbon le plus rapidement possible. Je vous expliquerai en quoi c'est vraiment la priorité absolue, au point qu'aussi malheureux que cela puisse être, il est selon moi préférable d'encourager la filière nucléaire si ça peut précipiter la réalisation de cet objectif.

Malheureusement, même le nucléaire pourrait bien ne pas être une solution. La filière basée sur l'Uranium 235 est vouée à disparaître dans un futur proche au vu des faibles réserves qui sont déjà bien entamées malgré la marginalité de son usage dans le monde [48]. La fusion nucléaire est encore très loin d'être opérationnelle, et des incertitudes théoriques pouvant compromettre sa faisabilité subsistent [37]. Cependant, il y a aussi les filières basées sur le Thorium - en cours de développement - ou autres éléments lourds traités actuellement comme des déchets, qui sont extrêmement prometteuses [53].

Ainsi, on peut toujours espérer qu'une solution miracle soit trouvée pour contourner le problème. Cependant, il vaudrait mieux qu'elle se concrétise rapidement car le temps commence à nous manquer. En prenant toutes les précautions que ce genre de synthèse impose, il n'est pas délirant d'estimer que nous avons déjà extrait de l'ordre de la moitié des ressources fossiles que nous sommes en droit d'extraire. Mais il serait biaisé d'en conclure que nous n'en sommes qu'à la moitié de l'ère industrielle, la consommation d'énergie étant toujours croissante et accélérée ; du fait principalement d'une explosion démographique qui semble aussi déraisonnable qu'inexorable.

Figure 2.4 – Reconstitution de l'historique de la population mondiale [10]



L'espèce humaine a mis 33000 ans à atteindre le milliard d'individus. Les anciens rayons du Soleil, piégés dans le sol, permirent alors à la population de doubler en 130 ans. Le troisième milliard ne prendra que 30 ans. Le quatrième seulement quatorze. Avec bientôt huit milliards d'humains à bord du navire, ces réserves vont fondre épouvantablement plus vite que par le passé.

Que ferons-nous alors ? Tous les secteurs d'activités seront touchés. L'exploitation des grandes cultures agricoles pourrait devenir presque impossible, les transports hors de prix, l'électricité rationnée.

A mon avis, la situation ne permet pas que nous nous contentions d'attendre cette hypothétique solution miracle. Il devient urgent de prendre les devants et de faire les efforts requis pour assurer la persistance d'une toute relative quiétude mondiale.

C'est pourquoi nous devons envisager une transition à partir des outils que nous avons aujourd'hui en notre possession. Disons déjà que nous devrons nous restreindre à ne nous baser que sur des ressources abondantes, pour éviter de seulement déplacer le problème.

Je pense bien sûr aux moyens de production renouvelables. Ils se caractérisent par l'exploitation exclusive de flux ou stocks d'énergie abondants, et par l'usage de minéraux ordinaires. Nous allons voir qu'il est difficile de satisfaire idéalement ces deux points.

L'hydraulique a le bon goût d'exploiter une ressource vraiment renouvelable à l'échelle de la vie sur Terre : les écoulements résultants de la circulation de l'eau. Cependant, on se frotte déjà à ses limites puisqu'on affecte grandement lesdits écoulements. En ce sens, on ne peut pas dire que l'énergie hydraulique

soit une ressource abondante. Le potentiel hydraulique mondial est estimé à $4 \times 10^{12} W$ [Source égarée, je suis presque sûr que c'était l'IHA mais je ne retrouve plus le document en question :( ].

La géothermie semble cumuler tous les avantages, bien que la ressource qu'elle exploite ne soit à strictement parler renouvelée qu'à la condition que notre consomation n'excède pas ce qui est produit dans le sol ; et qu'elle demande une technicité importante. Cependant, l'accès au formidable réservoir d'énergie qu'est le manteau terrestre est technologiquement hors de notre portée, c'est pourquoi l'exploitation géothermique se limite aux *panaches* (remontées de roches chaudes) et aux sources d'eaux chaudes. Or, il se trouve que dans les faits l'exploitation simultanée de toutes ces voies ne couvrirait que quelques pourcents de la consommation mondiale actuelle.

L'éolien se base sur les mouvements convectifs de l'atmosphère. Ces mouvements sont bien sûr répartis sur toute la surface du globe, ce qui lui affecte une densité de puissance faible au regard de ce qu'on a dans un cours d'eau. On n'est même pas sûrs que l'impact sur les vents d'une production massive d'électricité d'origine éolienne puisse être de toute façon négligé. Enfin, l'éolien fait usage intensif de minéraux rares comme le *néodyme* pour ses alternateurs.

Enfin, le solaire photovoltaïque et à concentration sont de parfaits candidats pour une transition durable car le premier n'exploite que du Silicium tandis que la ressource qu'ils captent est le rayonnement solaire, lequel est parfaitement renouvelé (en tous cas tant que le Soleil brille) et est la source d'énergie primaire principale à la surface de la Terre. Le second repose sur un système de chauffage d'un fluide par le rayonnement solaire, sur lequel vient s'adjoindre une moteur thermique et un alternateur. Cependant, la densité de puissance est encore une fois basse et surtout la production est contrainte par les intermittences jour-nuit et été-hiver.

Dans tous les cas, l'efficacité de ces installations est plutôt mauvaise. Le rendement de Carnot s'applique à la géothermie, pour des raisons liées au second principe un capteur éolien ne peut pas excéder un rendement de $\frac{16}{27}$ (en pratique beaucoup plus bas) [28] et celui du photovoltaïque ne dépasse pas 20% (mais si l'on se restreint à ne faire usage que de Silicium, c'est encore bien plus bas).

De façon générale, on peut faire état d'une très faible densité de puissance effective des renouvelables au regard de celle que peut dégager la combustion d'un hydrocarbure. Ceci explique que leur part soit beaucoup plus marginale que ce que la plupart des non-spécialistes pensent dans la mix énergétique aujourd'hui, et ce malgrès un investissement financier très important sur les dernières décennies. Nous allons voir que c'est bien là que réside toute l'essence du problème (sans mauvais jeu de mot).

Le tableau suivant résume la situation (notez qu'on utilise des unités différentes suivant qu'on parle de stock ou de flux). Les réserves de stock (dites *probables*) sont exprimées en années sur la base de la consommation de 2015 :

	Densité	Densité effective	Réserves
Charbon	$10000MJ/m^3$	$4000MJ/m^3$	?
Pétrole	$40000MJ/m^3$	$16000MJ/m^3$	~ 40 ans
Gaz naturel	$40000MJ/m^3$	$16000MJ/m^3$	~ 100 ans
U235	$1500MJ/mm^3$	$300MJ/mm^3$	~ 100 ans
Hydraulique	$14000W/m^2$	$10000W/m^2$	$\sim 10^{11}W$
Géothermie	-	-	$\sim 4 \times 10^{12}W$
Éolien	$210W/m^2$	$50W/m^2$	$\sim \infty$
Solaire PV	$340W/m^2$	$30W/m^2$	$\sim \infty$

FIGURE 2.5 – Comparatif des techniques de production d'énergie [40][62]

Remarquez que dans un monde où notre usage en hydrocarbures se trouverait réduit, les pays auraient toutes les chances de se tourner vers le nucléaire (dont la consommation devrait en toute logique exploser). Dans ces conditions, ce serait une grossière erreur que de croire que le nucléaire nous garantirait un apport énergétique complet pendant un siècle. Cette remarque s'applique par ailleurs pour toute réserve exprimée en années.

La densité de flux de la géothermie n'est pas renseignée, car elle dépend du fluide voué à remonter la chaleur vers la centrale. Pour le cas bien particulier de la géothermie, l'élément limitant est vraiment la rareté des puits de chaleur ; ce qui est indiqué par un potentiel estimé à seulement $10^{11}W$ (ceci en anticipant l'évolution technique du procédé) [15]. En fait, on peut raisonnablement exclure la géothermie de la course : il n'est pas envisageable de s'appuyer sur elle pour répondre à la demande d'énergie mondiale. Eventuellement, elle pourrait servir de moyen de production d'appoint pour les régions qui ont le privilège d'y avoir accès, mais rien de plus.

On peut finalement s'atteler à calculer les surfaces actives pour un mix 100% renouvelable. Je vois ça comme le point d'orgue de ce chapitre puisque ça nous donnera une vague idée de la faisabilité de la chose.

Partons sur la base du flux solaire. La densité de puissance du flux éolien est voisine, mais il est inexact d'en conclure que l'éolien prend moins de place que le solaire à puissance égale. L'éolien est certes plus pratique, car il ne restreint pas vraiment l'usage qu'on peut faire du terrain qui entoure l'éolienne, mais pour une raison qui découle encore une fois du second principe, on ne peut pas trop les rapprocher les unes des autres [63]. En fait, au sens de la surface au sol, l'éolien a une densité surfacique effective beaucoup plus faible que le solaire.

En outre, la gestion de l'intermittence n'est pas à prendre à la légère, les panneaux ne produisants rien la nuit. Pour assurer une certaine stabilité du réseau, nous sommes forcés de stocker l'énergie d'une façon ou d'une autre ; et par conséquent d'augmenter notre production pour compenser les pertes causées par les rendements inhérents aux installations de stockage. Il y a quelques années, j'aurais donc ajouté qu'il faille considérer le rendement de 40% du cycle complet de l'Hydrogène pour stocker une part de l'énergie produite - ce qui aurait fait gonfler la facture - mais avec l'arrivée des batteries Sodium-ion pour lesquelles le

travail de recherche arrive aujourd'hui à son terme et dont le rendement s'élève à plus de 80%, je me permets de négliger ces pertes.

Du coup, les choses sont plutôt décevantes de simplicité. Il suffit de diviser la densité de puissance effective du solaire photovoltaïque par la consommation de l'humanité (pour rappel $10^{13}W$), pour trouver une surface de $3 \times 10^{11}m^2$. Soit quelque chose comme la superficie de l'Allemagne.

Est-ce bien raisonnable ? La surface totale couverte par toutes les villes du monde est de $10^{12}m^2$. On s'en approche ! Nous avons besoin de remplir la surface occupée par les villes de panneaux solaires si nous voulons continuer de consommer la même quantité d'énergie. Bon, vous me direz qu'il ne faut remplir qu'un tiers de cette surface, mais franchement vous trouvez que ça change le message ? Même en équiper un dixième paraît incroyablement difficile au regard du délai qui nous est accordé.

En outre, si la solution de stockage à base de batteries me paraît viable en ce qui concerne l'intermittence jour-nuit, elle ne l'est en aucun cas pour ce qui est des chutes de production en hiver (du fait des volumes bien trop importants qu'il faudrait mettre en oeuvre). C'est pourtant la période de l'année où l'on a besoin du maximum d'énergie à cause du chauffage des habitats ; bien que nous négligerons ce dernier point (la différence avec l'été n'étant que de l'ordre de 30%) [9]. Si l'on désire rester sur un modèle 100% solaire, la seule solution qui s'offre à nous consiste donc à surdimensionner d'un facteur cinq la taille de toutes nos installations pour produire juste ce qu'il faut l'hiver [56], quitte à avoir de l'énergie à ne plus savoir qu'en faire l'été. Cette fois-ci, la surface active s'élève à $1,5 \times 10^{12}m^2$, laquelle dépasse vraiment la surface recouverte par toutes le villes du monde. Franchement, quoiqu'il advienne ce n'est pas envisageable.

Néanmoins, en diversifiant notre mix pour faire usage d'autres technbrûléeiques de production d'énergie renouvelable - à l'intermittence saisonnière moins prononcée, ou encore au potentiel fini mais au flux plus élevé - il se peut qu'on puisse imaginer s'approcher des $10^{13}W$ à peu près toute l'année. Après tout, le potentiel hydraulique mondial (qui cumule ces deux avantages) pourrait satisfaire à lui seul près de la moitié de cette demande ; bien que ce soit au prix d'un impact environnemental majeur sur les zones à proximités des cours d'eau. De la même façon, nous n'avons aucune raison de ne pas planter d'éolienne au milieu des projets de mer de panneaux qui viennent d'êtres envisagés, sinon le problème de l'extraction des ressources rares dont elles font massivement usage.

Vous avez là un parfait exemple de l'intérêt qu'il y a à quantifier les choses quand on se penche sur des sujets comme celui-ci. Je n'aurais pas eu le même discours à un ordre de grandeur près (qu'il soit dans un sens ou dans un autre).

Donc, je dirai que la conclusion de cette partie est que l'objectif n'est pas inaccessible. Je crois qu'au vu de ce qui vient d'être dit, on peut satisfaire les besoins des humains avec l'usage exclusif d'énergie renouvelable. Seulement, la transition sera *extrêmement difficile* ; surtout que la tendance est plutôt à un accroissement de la demande dans les prochaines années. Ce qui m'amène à évoquer le sujet principal des chapitres à venir : *comment surmonter cette difficulté ?*

A ce stade, il convient d'éclaircir tout à fait ma position : je qualifie cette

difficulté d'*extrème* mais c'est en fait bien plus que ça. Je ne trouve pas de mot assez fort pour vous faire ressentir à quel point il sera délicat de s'affranchir de ce problème. Au risque de me répéter, il est quand même question de construire en cinquante ans des ouvrages de haute technologie dont l'ampleur totale ressemble à celle d'un grand pays ! Quand un média parle de *défi énergétique*, l'euphémisme est si déprécié qu'il en devient ridicule. La situation est absolument inédite, probablement sans commune mesure avec les difficultés auxquelles l'humanité a eu à faire face dans toute son histoire.

Pour être tout à fait pragmatique, je pense que même en s'y donnant à fond dès maintenant, même avec une prise de conscience massive de l'ampleur du problème, et même en faisant preuve d'une intelligence collective totalement nouvelle et fantastique, nous avons toutes les chances de rater cet objectif. Et à mesure que le temps passe, ces chances s'amenuisent encore.

C'est-à-dire que même en mettant en place toutes les solutions que je pense *bonnes* et que je tâcherai de vous soumettre dans les prochains chapitres, nos consommations ont de très grandes chances de décroître ; la seule chose est que nous devons faire attention à que nos besoins diminuent d'autant. Il faut éviter à tout prix le manque, car celui-ci pourrait induire la perte de beaucoup de vies humaines.

A moins qu'une solution miracle comme celles que j'ai déjà évoquées ne s'avère fonctionnelle, nous devons vivre avec l'idée que nos modes de vies ne sont pas durables. De façon générale, je pense que l'homme devra accepter de se plier à la physique plutôt que de croire que l'inverse est possible. Par exemple, si l'hiver n'est pas la période idéale pour la production d'énergie, alors nous devrons nous adapter et reporter nos activités énergivores à dans six mois. Tout ce qui peut être optimisé doit l'être. Au final, ça revient simplement à *vivre en harmonie avec la nature*, ce qui est un projet certes un peu mièvre mais pas du tout dépourvu de sens.

Pour autant, il s'agit de rester optimistes si nous voulons mettre toutes les chances de notre coté. *Livrer un plan de sauvetage du monde*, voilà l'ambition-brûlée follement prétentieuse qu'a ce livre. Je vous laisserai juger de sa pertinence et de sa réalisabilité, et il n'est pas dit que je parvienne à vous convaincre ; mais il faut bien que quelqu'un essaye.

Outre la nécessité de repenser complètement la façon dont nos moyens de production sont assemblés, nous devons atteindre une sobriété maximale, ou elle nous sera imposée sans qu'on ne s'y soit préparé. Voilà le vrai défi auquel doit faire face l'humanité aujourd'hui, et sur lequel nous devons focaliser nos pensées. Ce que je souhaite faire avec ce livre, c'est prouver aux autres mais d'abord à moi-même qu'il existe bel et bien un moyen d'y arriver.

Quoiqu'il en soit, nous allons vivre une époque intéressante...

2.6 Le réchauffement climatique

Le sujet auquel je vais m'attaquer maintenant est extrèmement délicat. Du fait de l'austérité des ressources qui le documentent et du relatif haut niveau

scientifique que nécessite son étude sérieuse, j'ai mis plusieurs années avant de comprendre ce qui fait que la communauté de personnes oeuvrant au quotidien à améliorer la compréhension du réchauffement climatique s'accorde à dire qu'il n'y a pratiquement plus de doute possible vis-à-vis de la responsabilité de l'homme dans cette histoire.

Vous n'êtes probablement pas sans savoir que ce que je viens d'affirmer fait l'objet de débats houleux dans les salles de conférence et sur les réseaux sociaux. J'ai moi-même longtemps dit à qui voulait l'entendre que je n'arrivais pas à me faire un avis sur la question, pestant notamment contre la parcimonie du contenu vulgarisé rigoureux à son sujet. C'est pourquoi ce fut un exercice vraiment exaltant que d'écrire ce qui va suivre, car ça revenait à chercher à me convaincre moi-même d'une chose vis-à-vis de laquelle j'admettais mon ignorance (ceci en appliquant une méthodologie préconçue). Je dois dire que les choses se sont curieusement bien passées.

L'étude du réchauffement climatique surprend par sa complication. C'est sans aucun doute bien plus compliqué encore que la formation des étoiles par exemple. Cependant, il faut comprendre que la nature de cette complexité est bien singulière : elle réside dans le particularisme du système que l'on étudie - à savoir la Terre - et dans la multiplicité de ses phénomènes internes ; mais pas dans la méconnaissance de la physique qui régie lesdits phénomènes. Nous en verrons quelques-uns, mais on peut déjà citer les courants marins, la fonte des glaces ou encore la réflexion de la lumière par les nuages.

En fait, pris indépendemment il n'y a pas un seul de ces phénomènes que l'on ne connaisse pas très bien sur le plan physique. Cependant, considérés ensemble on est confronté à un couplage extrêmement élaboré dont les équations sont impossibles à résoudre à la main. C'est pourquoi on a recours à des ordinateurs qui vont simuler ce qu'on désigne sous le nom de *modèles climatiques*. Ceux-ci vont intégrer le plus de phénomènes possibles en vue de prévoir des comportements génériques qui pourraient bien advenir dans le futur. Bien sûr, il y aura toujours des incertitudes ; par exemple les futures éruptions volcaniques ou encore les décisions que prendront les hommes, mais aussi l'inexhaustivité des phénomènes modélisés ou encore l'imprécision de certaines grandeurs en présence comme la quantité d'hydrates de méthane dans les eaux profondes.

En outre, on ne peut pas étudier le réchauffement climatique sans avoir recours aux outils mathématiques adéquats. Cela justifie probablement en partie l'opacité à laquelle est confronté le non-scientifique quand il cherche à s'intéresser au sujet. Je vais essayer de simplifier ça au maximum sans pour autant éluder la construction du raisonnement global.

Parce-que ledit raisonnement s'avère relativement long à mener, je vais le résumer immédiatement afin que vous puissiez en avoir une vue d'ensemble avant même de l'aborder. Nous allons procéder en trois phases :

— Tout d'abord, nous allons voir que l'augmentation de la concentration de CO_2 ne peut s'expliquer que par les activités humaines.
— Ensuite, j'établierai que cette augmentation de la concentration de CO_2 est la cause d'une l'augmentation de la température moyenne à la surface de la terre.

— Pour finir, je fournirai des pistes pour prévoir l'évolution future de la température, et en donnerai les implications les plus substantielles.

Dans un monde qui ne souffre pas la mauvaise foi (pas le notre donc) et si la construction que je m'apprête à étayer est aussi solide que je le prétends, la preuve des deux premiers points devrait mettre fin au débat sur la cause anthropologique du réchauffement climatique. Si les arguments que j'avancerai ne vous paraissent pas probants, il va sans dire que je vous invite à me contacter pour me faire part des points que vous jugerez discutables. Pour ce qui est de l'anticipation de l'avenir du climat, je me contenterai de rapporter les données fournies par l'organisation internationale chargée de l'étude du réchauffement climatique, le *groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat*.

Commençons donc par regarder les raisons qui m'amènent à penser que l'augmentation de la concentration de CO_2 dans l'atmosphère (qu'aucune personne sensée ne remet en question, du fait de la facile reproductabilité de sa mesure) est bien la conséquence directe d'une consommation massive d'hydrocarbures par l'espèce humaine depuis la révolution industrielle.

La combustion d'un hydrocarbure est le foyer de la formation de multiples produits de réaction dont l'un est le *dioxyde de carbone* (que je désignerai par sa formule chimique CO_2) et un autre est le méthane (CH_4).

Ces composés chimiques sont à l'état gazeux aux conditions de température et de pression sur Terre, bien qu'ils puissent également se retrouver dissous dans l'eau.

Par souci de simplicité, nous allons nous restreindre à l'étude du CO_2, pour des raisons que nous allons voir bientôt.

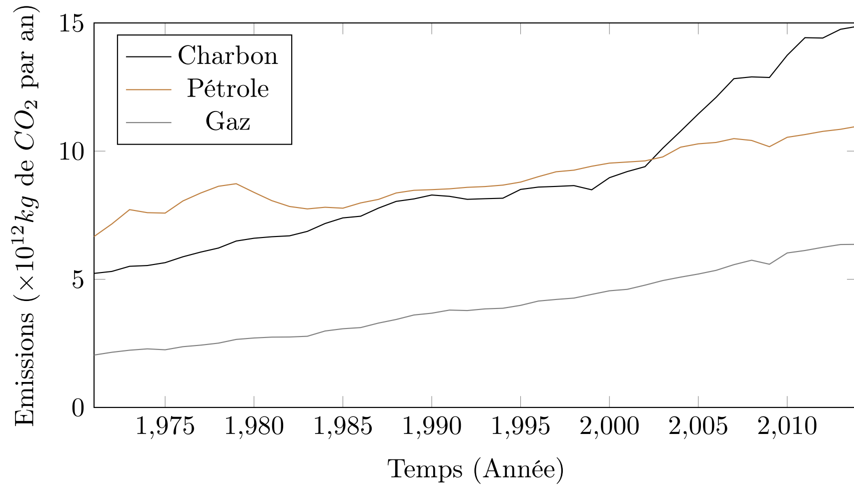
Il est clair que lors d'une telle combustion, du CO_2 qui n'existait pas avant se disperse dans l'atmosphère. Je dis qu'il n'existait pas avant, mais ce n'est pas tout à fait exact : les organismes qui sont devenus ces hydrocarbures ont absorbés du CO_2 de leur vivant. C'est ainsi qu'une certaine quantité de CO_2 de l'atmosphère s'est retrouvée piégée dans les sols, avant d'être massivement libérée pendant l'ère industrielle.

On pourrait s'arrêter là, et passer directement à la suite. Mais sur un sujet aussi délicat que le réchauffement climatique, on va vouloir vérifier que la réalité s'accorde bien avec la physique. Encore une fois, le système est si compliqué qu'il est très facile d'ignorer des facteurs externes qui ne devraient pas l'être ou encore de surévaluer la teneur de nos émissions, et de se tromper complètement dans nos conclusions.

Pour en avoir le coeur net, nous allons ainsi devoir mettre en correspondance l'évolution des émissions de CO_2 dues à l'homme avec celle de sa concentration dans l'atmosphère. La concentration exprime la quantité de CO_2 qu'il y a par unité de volume, et est donc proportionnelle au nombre de molécules de CO_2 que contient l'atmosphère.

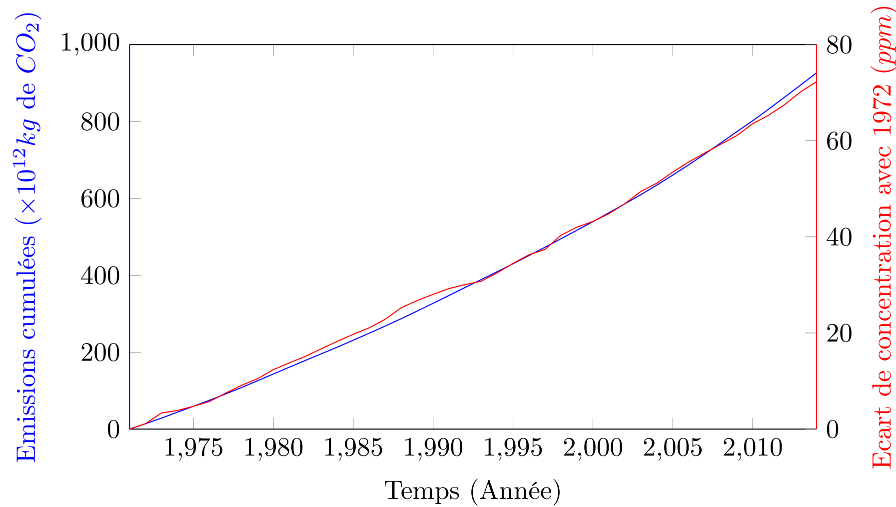
C'est à partir de 1972 que la récolte des données sur les émissions a été systématisée ; c'est pourquoi nous n'étudierons que les mesures ultérieures à cette date. Nous allons regarder le taux d'émission de chaque hydrocarbure (c'est-à-dire la quantité de CO_2 émise par joule d'hydrocarbure brûlée), puis le multiplier par sa consommation annuelle :

Figure 2.6 – Emissions mondiales de CO_2, par hydrocarbure [2]



Ces courbes sont intéressantes en soi. Elle traduisent l'évolution de la répartition des émissions entre les différents hydrocarbures. Cependant, ce qui va m'intéresser ici est leur *somme intégrée sur le temps*, c'est à dire la quantité totale de CO_2 déjà émise à chaque instant depuis 1972 (qui sera donc nulle à cette date). Cette courbe est bleue sur le graphique suivant. La rouge correspond en fait à la différence entre la concentration de CO_2 effectivement observée et sa mesure de 1972.

Figure 2.7 – Etablissement d'une corrélation entre les émissions anthropiques de CO_2 et la variation de sa concentration dans l'atmosphère [17]

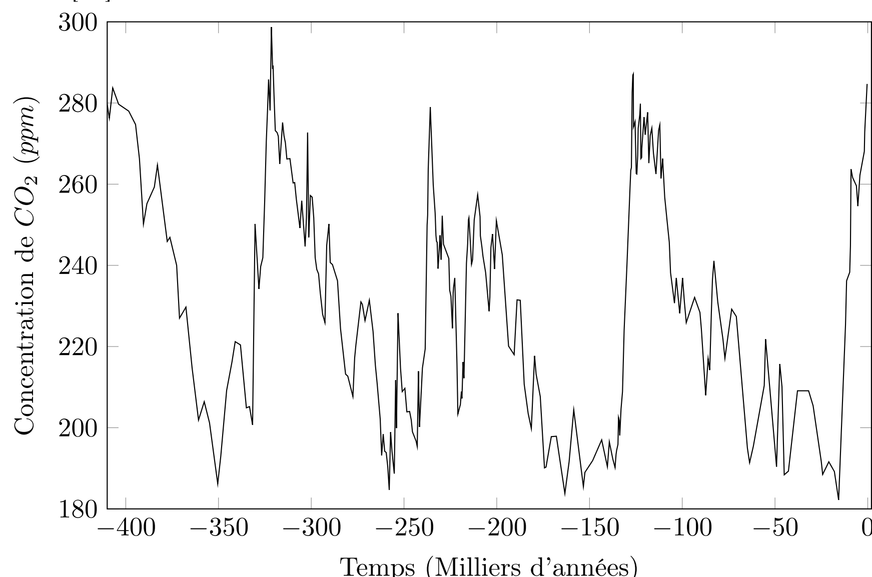


Je dois dire qu'avant de tracer ce graphique, je ne savais pas vraiment ce que j'allais obtenir. La raison est que j'exclus complètement les rétroactions positives et négatives de mon analyse, dont je parlerai plus loin. C'est pourquoi je m'attendais à avoir des erreurs importantes, bien qu'espérant néanmoins pouvoir mettre en évidence une corrélation entre ces deux courbes.

Contre toute attente, elles sont presque parfaitement superposées. L'augmentation de la concentration de CO_2 dans l'atmosphère est donc très bien expliquée par les activités humaines, avec une précision à toute épreuve.

Ca n'a pas toujours été le cas, bien sûr. La concentration de CO_2 a d'ailleurs beaucoup fluctué par le passé, comme le montrent des mesures effectuées sur des carottes glaciaires :

FIGURE 2.8 – Reconstitution de la concentration de CO_2 des 400000 dernières années [22]



La concentration en CO_2 s'élève aujourd'hui à 400*ppm*. Pourtant, on estime qu'elle ne se situait qu'autour des 280*ppm* en 1750. Vous vous en doutez probablement, entre temps l'homme a brûlé une quantité importante d'hydrocarbures, ce qui a provoqué une élévation absolument inédite de la concentration de CO_2 dans l'atmosphère en un laps de temps si cours.

La première étape du raisonnement qui mène à l'établissement de la cause anthropologique du réchauffement climatique est ainsi posée. Elle consiste à dire que les activités humaines sont la source d'une augmentation massive du CO_2 dans l'atmosphère, et j'espère que la très forte corrélation que j'ai mis en évidence aura su vous en convaincre.

C'était la partie facile. Nous allons maintenant introduire l'*effet de serre*, qui

contextualise ledit réchauffement.

Le Soleil a une température de surface de $5777K$. C'est à dire que ses molécules s'agitent de façon importante et permanente. Ces mouvements sont la source d'un champ électromagnétique appelé *rayonnement thermique*. Ce même champ arrive en partie sur Terre, sur laquelle il a une influence considérable.

La *thermodynamique du rayonnement* est la branche de la physique qui se charge d'étudier les corps chauds, leur émissivité et leur absorbance en terme d'ondes électromagnétiques. Son formalisme est essentiellement énergétique, c'est à dire qu'on va considérer le rayonnement comme le support d'un transfert d'énergie. Cependant, les formes que va prendre cette énergie sont multiples ; aussi nombreuses qu'il y a de longueurs d'onde possibles pour le rayonnement (et il y en a une infinité).

Cependant, une description basée sur un modèle classique ne permet pas de comprendre tous les phénomènes observés ; car les effets de nature quantique sont particulièrement visibles dans la façon dont les atomes émettent et absorbent des photons.

C'est pourquoi certaines molécules ne vont émettre ou *diffuser* (absorber puis ré-émettre) que certains types de rayonnement, suivant sa longueur d'onde, tout en ignorant magistralement les autres. Par exemple, la vapeur d'eau n'est pas influencée par la lumière visible (celle qui vient du Soleil) mais est très sensible aux infrarouges.

Or, la Terre elle-même absorbe le visible pour le transformer en infrarouge. Ce qui implique qu'une partie de l'infrarouge soit *piégée*, et fasse plusieurs allers-retours entre l'atmosphère et la surface terrestre (un peu à la façon d'une serre). Ce mécanisme induit une augmentation inexorable de la température par rapport à s'il n'y avait pas de vapeur d'eau dans l'atmosphère terrestre.

Notez qu'a contrario du CO_2, la vapeur d'eau est en équilibre thermodynamique avec les océans, c'est à dire qu'à température fixée on ne peut pas modifier durablement sa concentration. Si je fais bouillir de l'eau, la vapeur excédentaire va avoir tendance à retourner naturellement sous forme liquide.

Nous allons montrer par un bref calcul de thermodynamique du rayonnement que sans effet de serre, la température moyenne à la surface du globe avoisinerait les $-18°C$. Je tiens à vous montrer le calcul en question, car il nous resservira par la suite. Vous pouvez bien sûr éluder ce passage s'il vous semble trop technique.

Soit $\varphi_{émis}$ la densité de flux de puissance émise par la surface de la terre du fait de sa température. La *loi de Stefan-Boltzmann* appliquée à un *corps noir* nous dit que :

$$\varphi_{émis} = \sigma \times T^4$$

Avec $\sigma \sim 5.67 \times 10^{-8} W.m^{-2}.K^{-4}$ la *constante de Stefan-Bolzmann.*

Soit $\varphi_{recu} \sim 340 W.m^{-2}$ la densité de flux de puissance en provenance du Soleil reçue par la surface de la terre. Cette dernière étant partiellement réfléchissante, on doit définir un *albedo* $\alpha = 0.3$ qui correspond à la part du flux réfléchi (et qui ne participe donc pas au réchauffement).

A l'équilibre thermique (quand les choses se sont stabilisées et n'évoluent plus) on a :

$$\varphi_{\acute{e}mis} = (1 - \alpha)\varphi_{recu}$$

Il n'y alors plus qu'à dérouler le calcul :

$$\sigma \times T^4 = (1 - \alpha)\varphi_{recu}$$

$$T = \left(\frac{(1 - \alpha)\varphi_{recu}}{\sigma}\right)^{1/4} \sim 254K = -18°C$$

Si l'on souhaite prendre en compte l'effet de serre, c'est nettement plus compliqué. On doit ajouter au flux d'origine solaire le terme lié à l'effet de serre :

$$\varphi_{\acute{e}mis} = (1 - \alpha)\varphi_{recu} + \varphi_{serre}$$

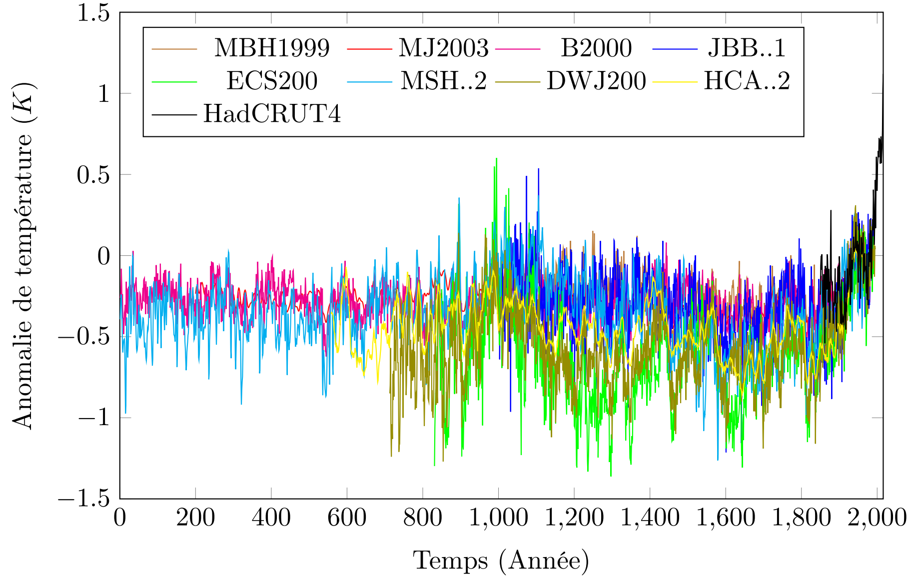
Cependant, ce flux additionnel ne peut être calculé que par une série dont chaque terme correspond à un aller-retour d'une part à chaque fois plus petite d'infrarouges. En outre, les émissivités rayonnantes de la vapeur d'eau et du CO_2 dépendent de la longueur d'onde, et le spectre d'émission de la terre dépend lui-même de la température. On doit donc nécessairement avoir recours à des ordinateurs pour calculer tout ça. En appliquant cette méthode et pour l'atmosphère de 1750, on trouve 14°C ce qui est nettement plus proche de la réalité (nous verrons plus loin une méthode empirique qui permet d'obtenir un résultat approché *à la main*).

Voici pour la situation telle qu'elle était avant la révolution industrielle. Nous allons maintenant vraiment entrer dans le coeur de la deuxième étape du raisonnement qui me convainc que le réchauffement climatique est bien le fait de l'homme. Je vais faire ça dans un instant, mais je tiens à prendre un peu de recul pour être tout à fait sûr que vous sachiez où l'on va.

La thèse qui fait consensus au sein de la communauté scientifique consiste à dire que, premièrement, les activités humaines accroissent la quantité de gaz à effet de serre dans l'atmosphère. Deuxièmement, ces gaz à effet de serre excédentaires piègent d'autant plus le rayonnement infrarouge et induisent une augmentation de la température d'au moins $0.7K$ en 250 ans. Nous devons donc maintenant déterminer si cette valeur de $0.7K$ est en adéquation avec la physique, et vérifier que l'augmentation de la température véritablement observée ne puisse effectivement s'expliquer que par ce biais.

Quand je vous ai parlé du petit âge glaciaire, je vous ai montré un graphique qui fait le bilan des travaux paléoclimatologiques (la science qui étudie le climat du passé, à une époque où personne n'avait le matériel pour faire les mesures) sur le dernier millénaire. Ce graphique est la figure 6.10 du quatrième rapport du GIEC, et est reproduit ici :

FIGURE 2.9 – Reconstitution de la figure 6.10 du 4ème rapport du GIEC [14][26][21]



La première chose que nous pouvons dire est que certains scénarii du passé sont très fluctuants. Les points sont ici discernables à l'échelle de la décennie, et on peut voir que d'une décennie sur l'autre la température d'un scénario donné peut varier de façon importante. Bon, dans l'absolu et indépendamment de ce graphique, on peut également dire que la température peut varier fortement d'un jour sur l'autre ; ou encore d'un mois sur l'autre du fait des saisons. Cependant, dans les derniers cas cela ne relève pas de la climatologie mais plutôt de la météorologie ; car en climatologie on s'intéresse aux échelles de temps plus grandes que ça, qui trouvent leurs racines dans des faits plus graves que le hasard des vas et viens des nuages dans l'atmosphère.

Bien sûr, nos courtes vies ne nous permettent absolument pas d'appréhender correctement des phénomènes climatiques. C'est pourquoi nous aurons besoin de réfléchir aux conséquences que pourrait avoir un tel changement sur Terre si nous voulons les anticiper.

Notre premier travail va consister à faire ce qu'on appelle en statistiques le *rejet de l'hypothèse nulle*. Sans rentrer dans les détails, il va s'agir d'appréhender ces séries de données comme des mesures de température qui fluctuent *normalement* autour d'une valeur moyenne. Autrement dit, on va chercher à savoir s'il est probable ou non que le décrochage final de la courbe de températures soit simplement dû à des évènements du même type que ceux qui ont eu lieu dans les trois premiers quarts du IIème millénaire.

Vous allez me dire que simplement en voyant le graphique précédent, il est évident que ce ne peut pas être le cas. L'ampleur du réchauffement est en effet

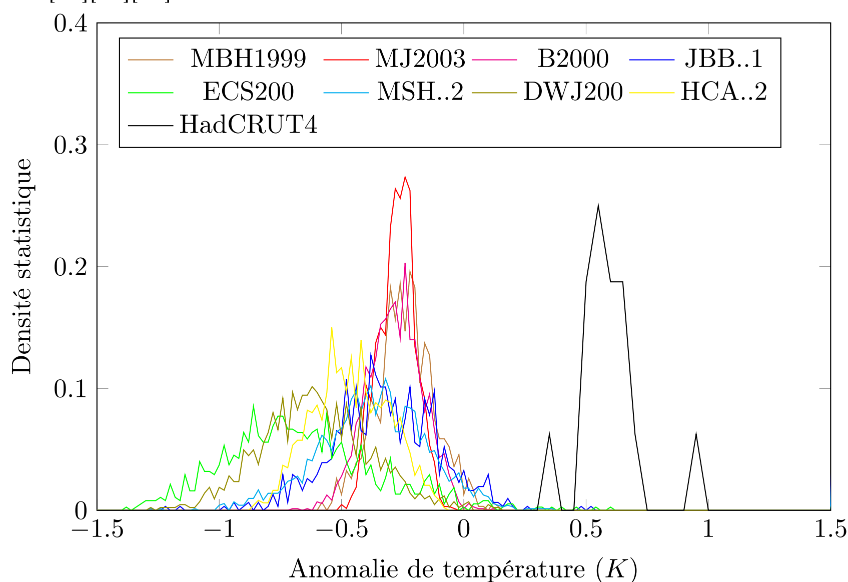
très visuelle, mais ce genre d'argument n'a pas valeur scientifique. La méthode que j'ai choisie pour porter un regard plus pénétrant sur ces données est de dessiner les *fonctions densités statistiques* associées à celles-ci. C'est une méthode classique, qui a fait ses preuves depuis longtemps dans toutes les branches des sciences expérimentales.

L'idée est de supprimer l'information *temporelle* des courbes précédentes pour gagner en lisibilité. Ça revient vraiment à ignorer tous les comportement globaux ; y compris le petit âge glaciaire.

La méthodologie sera donc la suivante : nous allons dessiner les fonctions densités des différentes séries de données en nous arrêtant à 1750 pour exclure tout ce qui s'est produit pendant l'ère industrielle. Ensuite, nous allons faire la même chose pour les données mesurées depuis 2000 (j'ai choisi cette date assez arbitrairement, on aurait en fait pû se contenter de la seule mesure de 2015).

C'est alors que nous pourrons voir s'il est probable ou non qu'il se soit passé quelque chose de plus important que d'habitude entre ces deux dates.

Figure 2.10 – Fonctions densités associées à la figure 6.10 du 4ème rapport du GIEC [14][26][21]



Toutes les courbes en couleur représentent les données paléoclimatologiques recensées par le GIEC. La courbe en noir correspond aux mesures récentes. Il est vrai que toutes ces courbes ne collent pas très bien entre elles ; mais la dernière est particulière. Sa moyenne se situe à $+0.7K$ d'*anomalie de température* (une échelle qui permet de passer sous silence les différences climatiques locales, mais peu importe). C'est donc une situation typique des 15 dernières années. Pourtant, cette valeur se situe à l'extrême-droite de n'importe laquelle des autres

courbes.

Ça ne vous parle peut-être pas, mais les statisticiens voient là un indice extrêmement solide de la réalité d'un bouleversement climatique majeur et récent. On pourrait écrire de longs calculs là dessus, et trouver la probabilité pour que l'hypothèse nulle soit véritablement invalidée, mais ce serait beaucoup trop compliqué pour finalement peu de chose ; car la situation est extrêmement claire au vu de ces courbes. Dans tous les cas de figure, il y a à vue de nez plus de 99% de chances pour que l'évolution récente des températures soit bien la marque d'un évènement majeur (probablement bien plus si l'on considère la seule année 2015 et ses $+0.98K$ d'anomalie de température).

On savait déjà qu'il y avait un réchauffement. On apprend maintenant qu'il trouve une cause profonde. Il y a cependant toujours une chose qui reste incertaine, et c'est la question première que nous nous sommes posés : est-il bel et bien le fait de l'homme ?

Pour répondre à cette question, il va falloir envisager toutes les explications alternatives. Ce ne peut pas être le fait d'une variation naturelle de la concentration de vapeur d'eau, pour la raison que j'ai donné tout à l'heure. On peut regarder succinctement quelques autres possibilités, mais nous ne serons jamais exhaustifs car c'est une activité à temps plein que de chercher une explication là où il n'y en a pas.

Prenons par exemple les volcans, ou encore les cycles solaires (hypothèse mise à l'honneur par les climatosceptiques). Ils permettent effectivement d'expliquer conjointement une grande partie les fluctuations passées, car on voit bien l'impact des premiers (remarquez que la trace de Salamas à la fin du XIIIème siècle est particulièrement prononcée) tandis que les périodes des seconds sont de l'ordre de la décennie ou du siècle. Cependant, ni les uns ni les autres ne suffisent à expliquer les données récentes.

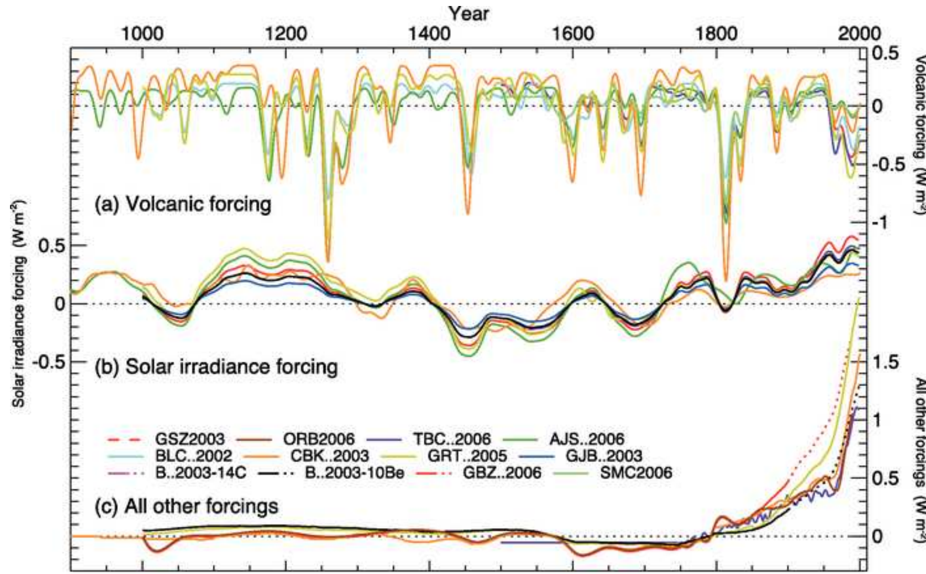


FIGURE 2.11 – Figure 6.13 du 4ème rapport du GIEC [14]

Remarquez que ces données s'expriment en $W.m^{-2}$, et correspondent donc à des flux supplémentaires (ou plutôt manquants dans le cas volcanique).

Faute de meilleure proposition, nous n'avons plus qu'à envisager l'hypothèse anthropologique. Pour achever notre démonstration, il ne nous reste plus qu'à mener un dernier calcul de thermodynamique du rayonnement pour vérifier que l'augmentation de température prévue par nos émissions de gaz à effet de serre est en adéquation avec celle effectivement observée.

Tout à l'heure, j'ai passé sous silence le calcul de l'influence de l'effet de serre sur la température du fait de sa complexité et de la nécessité d'avoir recours à des ordinateurs pour le mener à bien, mais en l'effectuant pour différentes concentrations de CO2 voisines de celle de l'atmosphère on trouve empiriquement qu'une petite différence de concentration engendre au premier ordre un effet de serre additionnel appelé *forçage radiatif* :

$$\varphi_{forcage} = 5.35 \times \ln \frac{C}{C_0}$$

Avec C_0 la concentration sans forçage (que nous prendrons égale à celle de 1750 soit $280ppm$) et C avec forçage (les $400ppm$ de 2015).

Cette expression n'a pas d'autre intéret que sa praticité. Elle va nous permettre de calculer la différence de température à l'équilibre qu'induit directement l'augmentation de CO2 dans l'atmosphère.

Remarquez qu'une première application numérique avec ces valeurs nous donne $\varphi_{forcage} = 1.9W.m^{-2}$, qui excède donc à lui seul les $0.7W.m^{-2}$ correspondants à la différence d'activité solaire entre 1750 et aujourd'hui ; ce qui renforce

l'idée que celle-ci ne puisse ainsi pas être considérée comme la cause principale du réchauffement climatique.

Reprenons l'équation d'équilibre avec l'effet de serre de 1750 à laquelle on ajoute le forçage :

$$\varphi_{émis} = (1-\alpha)\varphi_{recu} + \varphi_{serre} + \varphi_{forcage}$$

Ce qui donne la température de la planète avec la nouvelle concentration :

$$\sigma \times T^4 = (1-\alpha)\varphi_{recu} + \varphi_{serre} + \varphi_{forcage}$$

$$T = \left(\frac{(1-\alpha)\varphi_{recu} + \varphi_{serre} + \varphi_{forcage}}{\sigma}\right)^{1/4}$$

On s'intéresse à la différence de température ΔT à l'équilibre engendrée par le forçage :

$$\Delta T = \left(\frac{(1-\alpha)\varphi_{recu} + \varphi_{serre} + \varphi_{forcage}}{\sigma}\right)^{1/4} - \left(\frac{(1-\alpha)\varphi_{recu} + \varphi_{serre}}{\sigma}\right)^{1/4}$$

$$\Delta T = \left(\frac{(1-\alpha)\varphi_{recu} + \varphi_{serre}}{\sigma}\right)^{1/4} \times \left[\left(1 + \frac{\varphi_{forcage}}{(1-\alpha)\varphi_{recu} + \varphi_{serre}}\right)^{1/4} - 1\right]$$

Comme on suppose le terme de forçage petit devant le reste, on peut faire un *développement limité* à l'ordre 1 :

$$\Delta T = \left(\frac{(1-\alpha)\varphi_{recu} + \varphi_{serre}}{\sigma}\right)^{1/4} \times \left(1 + \frac{1}{4} \times \frac{\varphi_{forcage}}{(1-\alpha)\varphi_{recu} + \varphi_{serre}} - 1\right)$$

$$\Delta T = \frac{\varphi_{forcage}}{4\sigma^{1/4}\left((1-\alpha)\varphi_{recu} + \varphi_{serre}\right)^{3/4}}$$

Qu'on peut alors mettre sous la forme suivante :

$$\Delta T = \frac{\varphi_{forcage}}{4\sigma} \times \left(\frac{\sigma}{(1-\alpha)\varphi_{recu} + \varphi_{serre}}\right)^{3/4}$$

Pour reconnaître l'expression du cube de la température $T_0 \sim +14°C = 287K$ sans forçage radiatif :

$$\Delta T = \frac{\varphi_{forcage}}{4\sigma T_0^3}$$

En remplaçant le flux correspond au forçage radiatif par son expression, on trouve finalement :

$$\Delta T = \frac{5.35}{4\sigma T_0^3} \times \ln \frac{C}{C_0} \sim +0.36K$$

Ce qui suffit à expliquer pour moitié le réchauffement climatique, lequel s'élève à environ $+0.7K$ aujourd'hui.

Cette erreur relativement importante peut-être jugée décevante, et il faut se poser la question de son explication. Déjà, notez bien que je ne prends pas en compte les autres gaz à effet de serre émis par l'homme (qui sont cependant marginaux dans le bilan radiatif terrestre) comme le méthane.

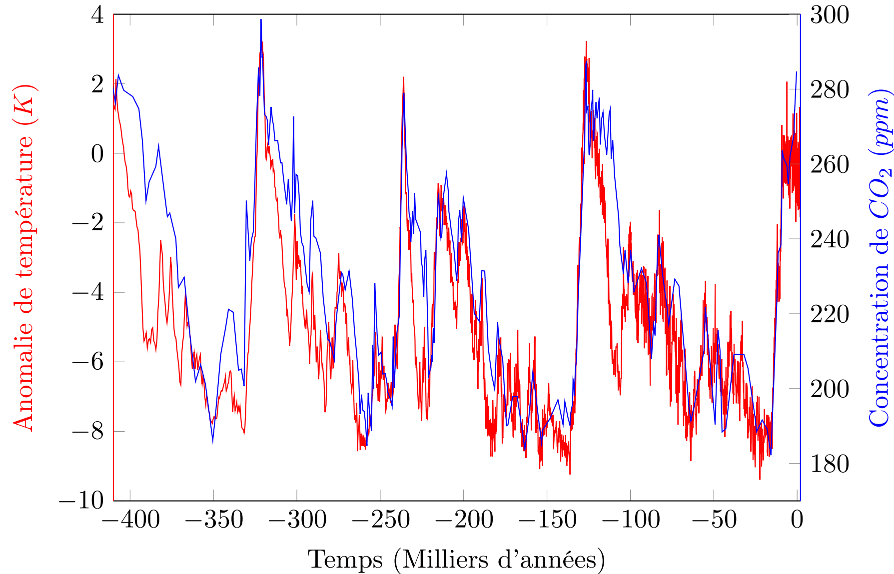
Ensuite, le modèle qui vient d'être développé est loin de décrire tous les phénomènes qui interviennent dans cette histoire. On dit qu'il n'est pas *rétroactif*, ce qui est une approximation extrèmement osée. Par exemple, j'ai déjà dit qu'on ne pouvait pas modifier durablement la concentration de la vapeur d'eau dans l'atmosphère à température fixée, mais je n'ai pas précisé ce qu'il en advient si l'on augmente la température. En fait, l'équilibre thermodynamique de la vapeur d'eau est alors déplacé, elle passe plus facilement à l'état gazeux ce qui augmente encore l'effet de serre et donc d'autant plus la température.

Ce genre de comportement expliquerait que Venus ait acquis un effet de serre extraordinaire (alors qu'il y a 4 milliards d'années il était analogue à celui de la Terre), avec 96% de dioxyde de carbone dans son atmosphère et $740K$ à sa surface.

On pourrait alors croire que l'équilibre soit instable, et que le moindre trajet en voiture provoque irrémédiablement la rupture de cet équilibre et l'emballement de la machine climatique. Ce serait néanmoins ignorer les rétroactions dites *négatives* qui au contraire s'opposent à la variation du climat, et assurent sa stabilité jusqu'à un certain point. C'est tout le travail des modèles climatiques que de prendre en compte le plus finement possible les différentes rétroactions, pour déterminer les caractéristiques de cet équilibre local et nous permettre de simuler le futur.

Un argument climatosceptique classique consiste à observer effectivement une corrélation entre les courbes de concentration de CO2 et de température, mais de noter qu'à l'échelle géologique la variation de température a toujours précédé la variation de CO2.

Figure 2.12 – Reconstitution des températures et concentrations de CO_2 des 400000 dernières années [22][23]



Cette causalité historique ne remet pas en cause mon raisonnement, dans le sens où les fluctuations passées ont toujours eu des origines externes ; comme des cycles dans l'activité du Soleil, ou bien des perturbations dans l'orbite de la Terre. C'est donc bien une variation de la température que ces comportements induisent, puis c'est au CO_2 d'être dissous dans l'océan ou au contraire évaporé de la même façon que la vapeur d'eau. C'est à dire que ce n'est pas tant que la quantité de CO_2 a véritablement varié sur Terre de façon importante par le passé, mais plutôt que son *équilibre thermochimique* a été régulièrement déplacé.

Aujourd'hui, c'est bien la réaction inverse qui est observée. On augmente la concentration de CO_2, et la température suit.

Je pourrais lister un grand nombre d'exemples de rétroactions connues et prises en compte dans les modèles climatiques, mais je ne vois pas bien l'intéret d'une telle discussion dans le cadre de ce livre et vais tout de suite passer aux résultats obtenus par la simulation des modèles climatiques conçus par la communauté scientifique qui travaille sur le sujet. Ceux-ci vont permettre de nous faire une vague idée de ce qui nous attend, selon qu'on continue ou pas d'émettre des gaz à effet de serre en grande quantité.

A cause de la chaoticité extrême du système, on ne va pas chercher à s'intéresser au très long terme. Le GIEC met fin à ses simulations en 2300, ce qui donne une vision assez réduite étant donnée l'inertie des phénomènes rétroactifs. On aimerait bien pouvoir se projeter plus loin, mais les incertitudes deviennent si grandes que ce n'est plus très pertinent.

Cependant, il nous manque une donnée importante pour mener à bien ces si-

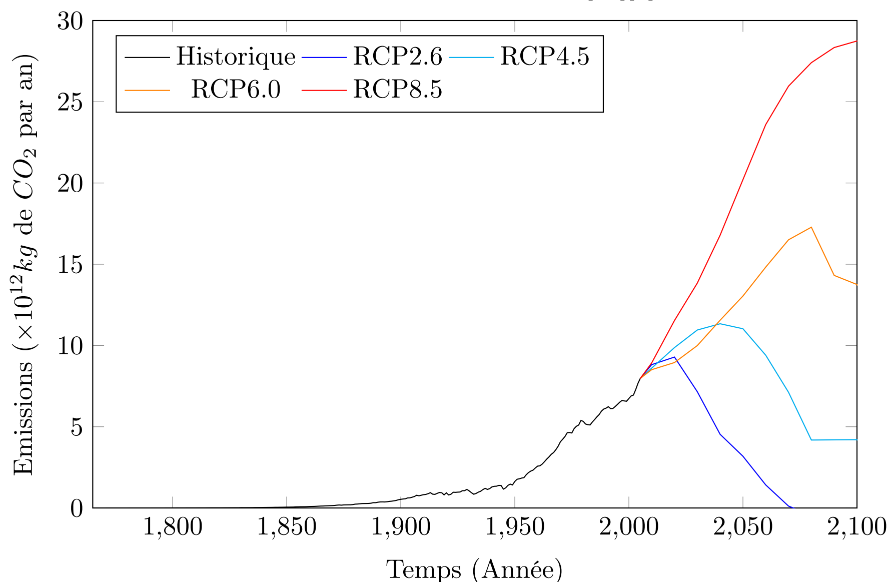
mulations. Il faut bien comprendre qu'étant donnée la situation, il est nécessaire de connaitre les émissions anthropologiques futures si l'on veut être en capacité de prédire l'avenir du climat. Or, si l'on peut toujours débattre passionnément d'une hypothétique prédictibilité des choix humains, il est clair que c'est quelque chose que l'on est absolument incapable de faire aujourd'hui.

C'est pourquoi le GIEC a conçu quatre scénarii socio-économiques qui font différentes hypothèses sur nos comportements futurs. J'ai donné tout à l'heure des ordres de grandeur des estimations communément admises en ce qui concerne les réserves d'hydrocarbures (relativement à l'année 2014), que l'on peut recouper avec les données de l'AIE en ce qui concerne leurs émissions propres sur la même année :

	Réserves (en années)	Emissions additionnelles potentielles
Charbon	?	?
Pétrole	40 ans	$450 \times 10^{12} kg$ de CO_2
Gaz naturel	100 ans	$650 \times 10^{12} kg$ de CO_2

Par ailleurs, voici les quatres scénarii d'émission de CO_2 proposés par le GIEC :

Figure 2.13 – Scénarii RCP [16][6]



En mettant ces courbes en regard du tableau précédent, on trouve que le scénario RCP2.6 correspond à brûler à peu près l'équivalent des réserves de pétrole. De la même façon, le scénario RCP6.0 se ramènerait à la combustion du pétrole et du gaz, tandis que RCP 8.5 simulerait le cas où l'on ajouterait

à ça une cinquantaine d'années de consommation de charbon. Le cas où l'on consommerait jusqu'à la dernière molécule d'hydrocarbure n'est pas modélisé par le GIEC, mais vous allez voir que les conséquences de RCP8.5 sont déjà bien assez dramatiques comme ça.

Le GIEC a donc combiné ses scenarii à son modèle climatique, pour finalement associer à chacun d'entre eux une prévision de l'évolution de l'anomalie de température :

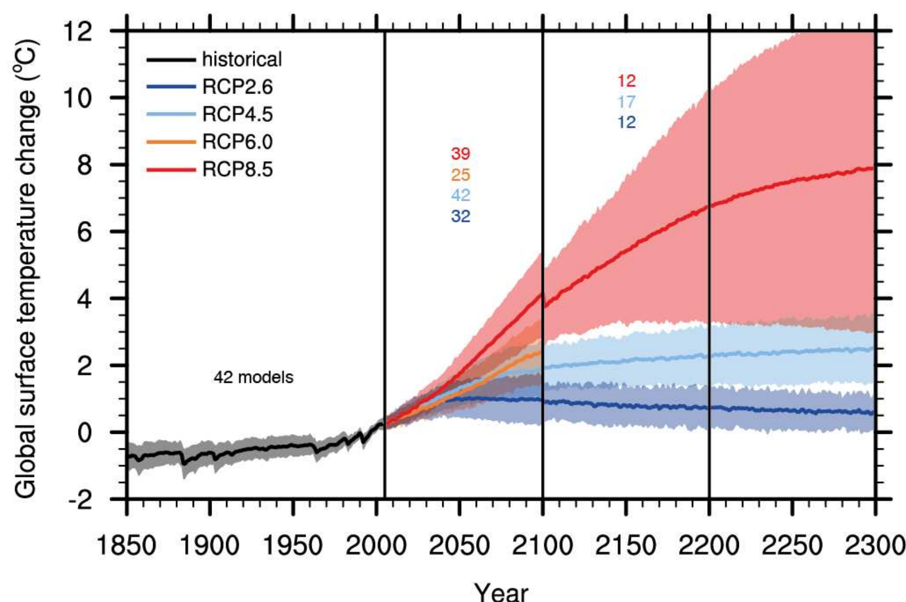


FIGURE 2.14 – Figure 12.05 du 5ème rapport du GIEC [16]

Ce graphique représente donc les résultats de quatre simulations distinctes, correspondantes à quatre scénarii d'émissions qui diffèrent seulement par la teneur des activités humaines présumées. Vous conviendrez que RCP8.5 est loin d'être le scénario le plus improbable, étant donné qu'il est celui où l'espèce humaine adopte une attitude passive vis-à-vis de la difficulté rencontrée ; ce qui a plus ou moins toujours été le cas jusqu'à présent, sauf dans des circonstances vraiment exceptionnelles. Pourtant, le 5ème rapport du GIEC stipule que la différence de température prévisible entre 1750 et 2300 dans ce scénario-ci s'élève à $+7.8 \pm 2.9K$ contre $+0.6 \pm 0.3K$ pour RCP2.6 (mais avec un pic à $1.0 \pm 0.3K$ en 2050), le scénario idéal mais extrêmement peu probable où nous annulons nos émissions en quelques décennies.

Voilà donc ce à quoi on s'expose en ne faisant rien pour sauvegarder les hydrocarbures dans le sol. $+7.8K$ en un demi millénaire, c'est probablement le résultat numérique qui mérite le plus d'attention quand on s'intéresse au réchauffement climatique.

Au premier abord, on peut se dire que c'est moins grave que ça n'aurait pû l'être. Cependant, ce serait mélanger perspectives métorologiques et perspectives climatiques. Il est vrai que d'un jour sur l'autre on peut de temps en temps avoir $8K$ de différence, mais il s'agit ici d'une élévation *moyenne* de la température sur toute la terre, et dont l'impact sur l'environnement et les terriens n'a rien à voir avec ce qu'on peut observer d'un jour sur l'autre ou au fil des saisons en un point du globe.

Néanmoins, il n'est pas pour autant aisé d'en anticiper les conséquences sur le long terme. C'est d'ailleurs pourquoi le GIEC limite ses projections à 2100 à ce propos, ce qui ne donne qu'une vision extrêmement court-termiste (mais c'est mieux que rien).

Voici une façon particulièrement frappante d'appréhender la chose : on estime que la différence de température moyenne entre la dernière ère glaciaire qui s'est achevée il y a 20000 ans et aujourd'hui s'élève à $+5K$.

L'orbite de la terre suit des cycles de période 100000 ans qui altèrent la quantité de rayonnement reçue en provenance du Soleil. Nous sommes actuellement dans une ère particulièrement chaude, ce qui signifie qu'en toute logique on devrait prochainement subir une nouvelle glaciation.

Par "prochainement", j'entends quelques milliers d'années. Le réchauffement climatique aura eu d'ici là tout le temps de se concrétiser. On peut imaginer qu'à terme la nouvelle glaciation finisse par amenuiser un réchauffement climatique de grande ampleur, mais ce ne sera qu'après que les terriens auront eu l'occasion d'en saisir toute la portée.

Du coup, on peut assimiler le scénario RCP8.5 à une nouvelle déglaciation, plus prononcée que la précédente mais surtout qui ne prendrait cette fois que 500 petites années. Ca nous donne un contexte pour essayer de visualiser les conséquences d'une chose si ahurissante. Commençons par dresser le panorama d'un monde diminué de $5K$:

- Tout le Canada et tout le nord de l'Europe (jusqu'à la France) étaient submergés par la glace.
- Toute la partie de l'Europe qui n'était pas enfouie sous la glace était recouverte par la toundra et la steppe.
- Le niveau de la mer était dévalué de $120m$.
- La diversité génétique était bien plus importante qu'à présent car la dernière déglaciation qui décima un grand nombre d'espèces n'avait pas encore eu lieu.

Au passage, c'est la large étendue de la calotte glaciaire qui a permis à l'Homme de passer d'Eurasie en Amérique par le détroit de Béring.

On peut aisément supputer que dans le cadre du scénario RCP8.5 de nombreuses parties du globe aujourd'hui habitables ne le seront plus, en raison d'une aridité trop difficile à vivre. On peut d'ailleurs recouper ce qu'il se passe actuellement en Syrie avec le réchauffement climatique. En effet, c'est bien la pire sècheresse jamais enregistrée dans la zone qui déclencha une famine juste avant le début des hostilités ; conjointement à la réduction de la production de pétrole qui appauvrit le pays et rendit plus difficiles les importations.

Il serait peu prudent d'affirmer que ce serait la cause unique de la montée de

Daesh, ou même sa cause première, mais on peut supposer que les choses ne se seraient pas passées de la même façon dans d'autres conditions. De plus, il est également difficile d'établir un lien direct entre ladite sécheresse et le réchauffement climatique ; les quelques années qu'a duré la sécheresse ne constituant pas une durée qui relève de la climatologie. On peut seulement dire que ces évènements sont de bons candidats pour incarner les premières conséquences du réchauffement climatique, mais aussi qu'ils risquent de se multiplier et de s'amplifier à l'avenir.

C'est avec une immense tristesse que j'en arrive à penser que l'humanité est en train de rendre désuète l'appelation "croissant fertile" ; réduisant du même coup en poussière les édifices qu'elle construisit lorsqu'elle n'en était encore qu'à apprendre à écrire et à compter.

Franchement, dans ces conditions, l'élevation du niveau de la mer est le cadet de nos soucis. Le GIEC estime que celui-ci pourrait s'élever de quelque chose comme $2m$ d'ici 2100 (du fait de la très grande inertie du système marin) [16], ce qui est loin d'être l'aspect le plus inquiétant de la catastrophe annoncée. Le plus triste est probablement qu'un grand nombre de constructions historiques pourraient à terme finir immergées, mais les hommes eux-même n'auront pas grand mal à s'adapter (relativement aux autres conséquences du réchauffement climatique en tous cas).

Enfin et surtout, la biodiversité pourrait endurer le pire cataclysme depuis l'extinction des dinosaures. Et ça s'annonce bien pire que lors de la dernière déglaciation, car les choses sont parties pour aller très vite.

La stabilité de l'environnement est un facteur prédominant dans la prolifération des formes de vies. Il n'y aucun lieu sur Terre qui ne surclasse les abysses en terme de diversité génétique, précisément pour cette raison. En induisant un changement rapide et violent à l'échelle globale, on pourrait bien voir un très grand nombre d'espèces s'éteindre ; alors qu'une partie d'entre elles auraient pû s'adapter si les choses s'étaient faites sur plusieurs dizaines de milliers d'années.

Il existe de nombreuses voies pour conclure à la disparition présumée d'une espèce donnée : acidification des océans, faible vitesses de migration (notamment des végétaux), prolifération des vecteurs de maladies et d'autres nuisibles... Mais aussi et surtout brisure de la chaîne alimentaire du fait de la disparition d'une autre espèce, les autres en étant immédiatement affectées.

Les choses iront trop vite pour que les espèces aient les moyens de s'adapter à leur nouvel environnement. Ce qui implique que si elles ne sont pas préalablement adaptées, si elles ne sont pas déjà prêtes à tolérer les changements induits par le réchauffement, elles s'éteindront.

Reste à savoir quelle part de la biosphère pourrait bien être en péril, et à ce propos nous n'en savons encore presque rien. Les valeurs avancées par les spécialistes s'étendent de 20% à 70%, ce qui montre bien que l'étude de ce sujet en est à ses balbutiements.

Cependant, il n'est pas dit que les espèces qui perdureront ne verront pas leur population diminuer considérablement. Et parmi toutes celles qui persisteront vraisemblablement, il y en a une qui peut s'attendre à prendre particulièrement cher : la nôtre.

Il devient vain que je continue de m'appliquer à donner des valeurs numériques pour étayer mes propos, les incertitudes étant bien trop grandes. Personne ne sait combien d'êtres humains risquent de voir leur vie écourtée du fait du réchauffement climatique. Personne ne sait non plus combien de naissances n'auront pas lieu, et pas plus combien de représentants comptera l'humanité dans les siècles à venir.

En fait, on en revient très exactement à la situation à laquelle nous nous étions confrontés avec le nucléaire : on n'a presque aucune idée des faits précis que peuvent engendrer les catastrophes nucléaires et climatiques, mais on sait *a minima* qu'ils peuvent-être désastreux. Cependant, à vue de nez, le réchauffement climatique me paraît plus dangereux encore. C'est un jugement très subjectif, je dirai simplement qu'il tient au fait qu'on ait plus d'indices sur son extrême gravité que pour les accidents nucléaires ; ce qui ne veut pas dire que les accidents nucléaires soient moins graves, juste qu'on en sache moins sur eux.

Voilà pourquoi je ne me définis pas comme antinucléaire aujourd'hui ; bien que je pense qu'une fois nos émissions de gaz à effet de serre suffisament diminuées, il faille à terme trouver le moyen de nous passer également du nucléaire (en tous cas sous sa forme courante).

C'est peut-être une erreur que de faire passer le réchauffement climatique avant le nucléaire, mais au vu des données que j'ai tâché de récolter je pense que c'est la décision la plus rationnelle. Les générations futures m'en verront navré s'il s'avère que je me suis trompé.

Pour conclure ce chapitre, je dirai que l'homme est forcé de relever le défi le plus ardu qu'il n'ait jamais eu à relever ; et de très loin. Il faudra faire preuve d'une grande intelligence pour prendre les décisions qui mèneront à l'impact environnemental le plus faible, ainsi qu'à la minoration du nombre de vies humaines perdues dans l'opération.

L'intelligence requise, je pense que nous ne l'avons pas encore. Bien sûr, à titre individuel on peut trouver des personnes très inspirantes, aimer leurs idées, apprécier leurs choix et vénérer leurs accomplissements. Mais au niveau collectif, les choses sont encore beaucoup trop archaïques pour avoir la moindre chance de sortir l'humanité de la boue dans laquelle elle s'est enlisée.

Néanmoins, je pense qu'on peut avoir de bonnes raisons d'être optimistes. Les choses évoluent rapidement, la mise en place récente d'internet offre de nouvelles possibilités qui pourraient bien nous mener à accomplir ce que nous n'aurions jamais pû accomplir autrement : la réalisation d'un semblant d'utopie, où les hommes avanceraient ensemble et profiteraient de façon optimale du génie de chacun. M'est avis que c'est la condition nécessaire et suffisante pour que nous allions suffisament vite pour que le problème ne se résolve pas de lui-même par le génocide et le chaos.

Il se peut que nous soyons à l'aube du fragment d'histoire le plus grandiose et le plus excitant qui nous ait été donné d'écrire. La passivité pourrait bien provoquer notre chute, mais en s'appliquant à bifurquer avec adresse nous sommes en droit d'espérer voir de nos propres yeux la bascule de la civilisation industrielle vers une civilisation synergique, qui aurait toutes les caractéristiques rêvées pour que l'humanité s'épanouisse et accomplisse ce pour quoi elle est là ; si tant est

qu'une telle chose existe.

La technologie nous a mené dans une impasse dont seule la technologie pourra nous faire sortir. Nous sommes dos au mur, mais il reste la fuite en avant. Nous ne pouvons pas nous permettre d'avoir peur de ce que nous y trouverons, alors laissons-nous aller vers cet inconnu fascinant et que la sagesse guide nos pas.

Bibliographie

[1] International Atomic Energy Agency. The database on nuclear power reactors. https://www.iaea.org/PRIS/, 2016. [Online ; accessed 09-December-2016].

[2] International Energy Agency. Co2 emissions from fuel combustion highlights. https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/co2-emissions-from-fuel-combustion-highlights-2016.html, 2016. [Online ; accessed 11-December-2016].

[3] ... Atsuki Hiyama, Chiyo Nohara. The biological impacts of the fukushima nuclear accident on the pale grass blue butterfly. http://www.nature.com/articles/srep00570, 2012. [Online ; accessed 06-December-2016].

[4] BP. Statistical review of world energy. http://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/statistical-review-of-world-energy.html, 2016. [Online ; accessed 09-December-2016].

[5] Thomas Cabaret. Mon interprÃ©tation - passe-science 20. https://www.youtube.com/watch?v=WSD5oYWr9-s, 2016. [Online ; accessed 01-December-2016].

[6] CMIP5. Rcp concentration calculation and data. http://www.pik-potsdam.de/~mmalte/rcps/, 2010. [Online ; accessed 13-December-2016].

[7] International Commission On Large Dams. General synthesis. http://www.icold-cigb.net/GB/World_register/general_synthesis.asp, 2016. [Online ; accessed 09-December-2016].

[8] Observatoire Historique de Marseille. Les atmosphÃ¨res planÃ©taires. https://astronomia.fr/2eme_partie/planetes/atmospheres.php, 2016. [Online ; accessed 06-December-2016].

[9] EDF. Production d'Ã©lectricitÃ© en france. https://www.data.gouv.fr/fr/datasets/production-d-electricite-en-france-nd/, 2016. [Online ; accessed 10-December-2016].

[10] Max Roser Esteban Ortiz-Ospina. World population growth. https://ourworldindata.org/world-population-growth/, 2010. [Online ; accessed 09-December-2016].

[11] Richard Phillips Feynman, Robert B Leighton, and Matthew Sands. *Feynman lectures on physics. vol. 1 : Mainly mechanics, radiation and heat.* Addison-Wesley, 1979.

[12] Kees Geluk. Chimp ayumu touching numbers 1-9 smart ! https://www.youtube.com/watch?v=JkNV0rSndJ0, 2007. [Online ; accessed 01-December-2016].

[13] Greta J. Orris Gordon B. Haxel, James B. Hedrick. Rare earth elements ?critical resources for high technology. https://pubs.usgs.gov/fs/2002/fs087-02/, 2002. [Online ; accessed 02-June-2016].

[14] IPCC. Ipcc fourth assessment report. https://www.ipcc.ch/report/ar4/, 2007. [Online ; accessed 06-December-2016].

[15] IPCC. Scoping meeting on renewable energy sources. http://www.ipcc.ch/pdf/supporting-material/proc-renewables-lubeck.pdf, 2008. [Online ; accessed 10-December-2016].

[16] IPCC. Ipcc fifth assessment report. https://www.ipcc.ch/report/ar5/, 2014. [Online ; accessed 12-December-2016].

[17] Earth System Research Laboratory. Trends in atmospheric carbon dioxide. www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/, 2016. [Online ; accessed 11-December-2016].

[18] Jean Laherrere. World, us, saudi arabia, russia and uk oil production and reserves. https://aspofrance.files.wordpress.com/2016/10/jl_reservesus_sa_-ru_uk_2016.pdf, 2016. [Online ; accessed 09-December-2016].

[19] IowaPrimate .LearningSanctuary. Kanzi and novel sentences. https://www.youtube.com/watch?v=2Dhc2zePJFE, 2009. [Online ; accessed 01-December-2016].

[20] Vaclav Smil Max Roser. Energy production and changing energy sources. https://ourworldindata.org/energy-production-and-changing-energy-sources, 2010. [Online ; accessed 09-December-2016].

[21] Climatic Research Unit at the University of East Anglia Met Office Hadley Centre. Hadcrut4. http://www.metoffice.gov.uk/hadobs/hadcrut4/, 2016. [Online ; accessed 06-December-2016].

[22] Jean Robert Petit. Vostok ice core data for 420,000 years. ftp://ftp.ncdc.noaa.gov/pub/data/paleo/icecore/antarctica/vostok/co2nat.txt, 2001. [Online ; accessed 12-December-2016].

[23] Jean Robert Petit. Vostok ice core data for 420,000 years. ftp://ftp.ncdc.noaa.gov/pub/data/paleo/icecore/antarctica/vostok/deutnat.txt, 2001. [Online ; accessed 12-December-2016].

[24] Laurent Sacco. Cosmologie : pourra-t-on voir la naissance de la masse des particules ? http://www.futura-sciences.com/sciences/actualites/univers-cosmologie-pourra-t-on-voir-naissance-masse-particules-52505/, 2014. [Online ; accessed 06-December-2016].

[25] PSR / IPPNW Switzerland. Health of liquidators (clean-up workers), 20 years after the chernobyl explosion. http://www.ncf-net.org/library/HealthOfLiquidatorsTwentyYearsAfterChernobylExplosion.pdf#page=30, 2005. [Online ; accessed 06-December-2016].

[26] Keith Briffa Tim Osborn. Ipcc ar4 palaeoclimate data. https://crudata.uea.ac.uk/~timo/datapages/ipccar4.htm, 2007. [Online ; accessed 06-December-2016].

[27] Wikipedia. Archimedes' principle — Wikipedia, the free encyclopedia. http://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Archimedes'%20principle&oldid=753110568, 2016. [Online ; accessed 06-December-2016].

[28] Wikipedia. Betz's law — Wikipedia, the free encyclopedia. http://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Betz's%20law&oldid=751958453, 2016. [Online ; accessed 10-December-2016].

[29] Wikipedia. Big Bounce — Wikipedia, the free encyclopedia. http://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Big%20Bounce&oldid=752627204, 2016. [Online ; accessed 03-December-2016].

[30] Wikipedia. Binary number — Wikipedia, the free encyclopedia. http://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Binary%20number&oldid=752023951, 2016. [Online ; accessed 29-November-2016].

[31] Wikipedia. Broca's area — Wikipedia, the free encyclopedia. http://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Broca's%20area&oldid=752338331, 2016. [Online ; accessed 01-December-2016].

[32] Wikipedia. Campbell's mona monkey — Wikipedia, the free encyclopedia. http://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Campbell's%20mona%20monkey&oldid=748226467, 2016. [Online ; accessed 03-December-2016].

[33] Wikipedia. Chromatid — Wikipedia, the free encyclopedia. http://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Chromatid&oldid=748400254, 2016. [Online ; accessed 01-December-2016].

[34] Wikipedia. Copernican Revolution — Wikipedia, the free encyclopedia. http://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Copernican%20Revolution&oldid=750611602, 2016. [Online ; accessed 06-December-2016].

[35] Wikipedia. Covalent bond — Wikipedia, the free encyclopedia. http://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Covalent%20bond&oldid=751179715, 2016. [Online ; accessed 06-December-2016].

[36] Wikipedia. Dark energy — Wikipedia, the free encyclopedia. http://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Dark%20energy&oldid=752054166, 2016. [Online ; accessed 29-November-2016].

[37] Wikipedia. Disruption (tokamak) — Wikipedia, the free encyclopedia. https://fr.wikipedia.org/wiki/Disruption_(tokamak), 2016. [Online ; accessed 09-December-2016].

[38] Wikipedia. Earth's energy budget — Wikipedia, the free encyclopedia. http://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Earth's%20energy%20budget&oldid=750139470, 2016. [Online ; accessed 04-December-2016].

[39] Wikipedia. Electroweak epoch — Wikipedia, the free encyclopedia. http://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Electroweak%20epoch&oldid=741549305, 2016. [Online ; accessed 06-December-2016].

[40] Wikipedia. Energy density — Wikipedia, the free encyclopedia. http://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Energy%20density&oldid=751619661, 2016. [Online ; accessed 06-December-2016].

[41] Wikipedia. Formation and evolution of the Solar System — Wikipedia, the free encyclopedia. http://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Formation%20and%20evolution%20of%20the%20Solar%20System&oldid=749558295, 2016. [Online ; accessed 29-November-2016].

[42] Wikipedia. Genome — Wikipedia, the free encyclopedia. http://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Genome&oldid=751967449, 2016. [Online ; accessed 01-December-2016].

[43] Wikipedia. Gravitational energy — Wikipedia, the free encyclopedia. http://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Gravitational%20energy&oldid=749609340, 2016. [Online ; accessed 04-December-2016].

[44] Wikipedia. Higgs boson — Wikipedia, the free encyclopedia. http://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Higgs%20boson&oldid=751439237, 2016. [Online ; accessed 06-December-2016].

[45] Wikipedia. Isotopes of gold — Wikipedia, the free encyclopedia. http://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Isotopes%20of%20gold&oldid=744058051, 2016. [Online ; accessed 10-December-2016].

[46] Wikipedia. Kinetic energy — Wikipedia, the free encyclopedia. http://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Kinetic%20energy&oldid=751325934, 2016. [Online ; accessed 03-December-2016].

[47] Wikipedia. Light cone — Wikipedia, the free encyclopedia. http://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Light%20cone&oldid=744176911, 2016. [Online ; accessed 02-December-2016].

[48] Wikipedia. List of countries by uranium reserves — Wikipedia, the free encyclopedia. http://en.wikipedia.org/w/index.php?title=List%20of%20countries%20by%20uranium%20reserves&oldid=732186874, 2016. [Online ; accessed 09-December-2016].

[49] Wikipedia. Little Boy — Wikipedia, the free encyclopedia. http://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Little%20Boy&oldid=752975521, 2016. [Online ; accessed 06-December-2016].

[50] Wikipedia. Little Ice Age — Wikipedia, the free encyclopedia. http://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Little%20Ice%20Age&oldid=750713843, 2016. [Online ; accessed 06-December-2016].

[51] Wikipedia. Loop quantum gravity — Wikipedia, the free encyclopedia. http://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Loop%20quantum%20gravity&oldid=747736582, 2016. [Online ; accessed 02-December-2016].

[52] Wikipedia. Maxwell's equations — Wikipedia, the free encyclopedia. http://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Maxwell's%20equations&oldid=753239803, 2016. [Online ; accessed 06-December-2016].

[53] Wikipedia. Molten salt reactor — Wikipedia, the free encyclopedia. http://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Molten%20salt%20reactor&oldid=752585490, 2016. [Online ; accessed 10-December-2016].

[54] Wikipedia. Noether's theorem — Wikipedia, the free encyclopedia. http://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Noether's%20theorem&oldid=751101521, 2016. [Online ; accessed 03-December-2016].

[55] Wikipedia. Oil reserves — Wikipedia, the free encyclopedia. http://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Oil%20reserves&oldid=747825015, 2016. [Online ; accessed 09-December-2016].

[56] Wikipedia. Photovoltaics — Wikipedia, the free encyclopedia. http://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Photovoltaics&oldid=753833078, 2016. [Online ; accessed 10-December-2016].

[57] Wikipedia. Proxima Centauri b — Wikipedia, the free encyclopedia. http://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Proxima%20Centauri%20b&oldid=749337906, 2016. [Online ; accessed 29-November-2016].

[58] Wikipedia. Rubik's Cube — Wikipedia, the free encyclopedia. http://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Rubik's%20Cube&oldid=750880737, 2016. [Online ; accessed 03-December-2016].

[59] Wikipedia. Sedimentation — Wikipedia, the free encyclopedia. http://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Sedimentation&oldid=750168906, 2016. [Online ; accessed 06-December-2016].

[60] Wikipedia. Solar constant — Wikipedia, the free encyclopedia. http://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Solar%20constant&oldid=711347488, 2016. [Online ; accessed 06-December-2016].

[61] Wikipedia. Synthesis of precious metals — Wikipedia, the free encyclopedia. http://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Synthesis%20of%20precious%20metals&oldid=750901701, 2016. [Online ; accessed 09-December-2016].

[62] Wikipedia. Thermal power station — Wikipedia, the free encyclopedia. http://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Thermal%20power%20station&oldid=753191187, 2016. [Online ; accessed 10-December-2016].

[63] Wikipedia. Turbulence — Wikipedia, the free encyclopedia. http://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Turbulence&oldid=753671019, 2016. [Online ; accessed 10-December-2016].

[64] Wikipedia. Uranium-235 — Wikipedia, the free encyclopedia. http://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Uranium-235&oldid=752269654, 2016. [Online ; accessed 06-December-2016].

[65] Wikipedia. Van der Waals force — Wikipedia, the free encyclopedia. http://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Van%20der%20Waals%20force&oldid=753124344, 2016. [Online ; accessed 06-December-2016].

[66] Wikipedia. World energy consumption — Wikipedia, the free encyclopedia. http://en.wikipedia.org/w/index.php?title=World%20energy%20consumption&oldid=752672759, 2016. [Online ; accessed 04-December-2016].

[67] Wikipedia. YangMills theory — Wikipedia, the free encyclopedia. http://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Yang%E2%80%93Mills%20theory&oldid=722917328, 2016. [Online ; accessed 06-December-2016].